

Escola Universitaria Politécnica



**UNIVERSIDADE DA CORUÑA**

**Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática**

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

TFG Nº: **770G01A190**

TÍTULO: **BANCO DE PRUEBAS PARA MONITORIZACIÓN Y CONTROL  
DE MOTOR TRIFÁSICO**

AUTOR: **ÁLVARO MICHELENA GRANDÍO**

TUTOR: **JOSÉ LUIS CALVO ROLLE  
ESTEBAN JOVE PÉREZ**

FECHA: **JUNIO DE 2020**

Fdo.: EL AUTOR

Fdo.: EL TUTOR





**TÍTULO: BANCO DE PRUEBAS PARA MONITORIZACIÓN Y CONTROL  
DE MOTOR TRIFÁSICO**

---

# **ÍNDICE**

---

**PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

**AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N**

**15405 - FERROL**

**FECHA: JUNIO DE 2020**

**AUTOR: EL ALUMNO**

**Fdo.: ÁLVARO MICHELENA GRANDÍO**



<b>I</b>	<b>ÍNDICE</b>	<b>3</b>
	Contenidos del TFG	5
	Listado de figuras	11
	Listado de tablas	15
	Listado de códigos de programación	17
<b>II</b>	<b>MEMORIA</b>	<b>19</b>
	Índice del documento Memoria	21
<b>1</b>	<b>OBJETO</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>ALCANCE</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	<b>27</b>
3.1	Plantas de control del Laboratorio de Optimización y Control	27
3.1.1	Planta de control de temperatura	27
3.1.2	Planta de control de nivel	28
3.1.3	Planta de controles varios	28
3.2	Motor eléctrico [2]	29
3.2.1	Motor trifásico asíncrono	30
3.3	Variadores de frecuencia [8] [7]	32
3.4	Regulador PID [1]	35
3.4.1	Acción proporcional (P) [1]	35
3.4.2	Acción integral (I) [1]	36
3.4.3	Acción derivativa (D) [1]	36
<b>4</b>	<b>NORMAS Y REFERENCIAS</b>	<b>38</b>
4.1	Disposiciones legales y normas aplicadas	38
4.2	Bibliografía	38
4.3	Software empleado	38
4.3.1	Software de diseño gráfico	38
4.3.2	Software para impresión 3D	38
4.3.3	Software de diseño y simulación de circuitos electrónicos	38
4.3.4	Software de diseño de circuitos impresos	38
4.3.5	Software de programación	39
4.3.6	Software de edición de texto	39
4.3.7	Software para esquemas y diagramas	39
4.4	Otras referencias	39
4.5	Referencias gráficas	41
<b>5</b>	<b>DEFINICIONES Y ABREVIATURAS</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>REQUISITOS DE DISEÑO</b>	<b>46</b>
6.1	Requisitos de diseño del banco de pruebas	46
6.2	Requisitos de funcionalidad del sistema	46
6.3	Requisitos de hardware	47
6.4	Requisitos de software	47

6.5	Requisitos de alimentación del proyecto . . . . .	47
7	ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES . . . . .	48
7.1	Diseño mecánico del sistema . . . . .	49
7.2	Estudio de las alternativas presentes en el mercado, para la selección del motor empleado . . . . .	50
7.3	Estudio de los diferentes variadores de frecuencia comerciales . . . . .	53
7.4	Selección de sensores empleados para medir de la velocidad de rotación del motor [10] . . . . .	54
7.4.1	Tipos de sensores de velocidad . . . . .	54
7.4.2	Tipos de montaje de los encoders . . . . .	56
7.4.3	Clasificación de los acoples . . . . .	58
7.4.4	Diseño de sistemas alternativos para el acople de ejes . . . . .	60
7.4.5	Selección del encoder magnético . . . . .	62
7.5	Análisis de los diferentes tipos de cargas para acoplar al motor . . . . .	63
7.6	Análisis y diseño de los sistemas y elementos de protección . . . . .	65
7.7	Diseño de circuitos electrónicos de adaptación de señales y Tarjeta de Adquisi- ción de Datos . . . . .	67
7.7.1	Tarjeta de Adquisición . . . . .	67
7.7.2	Diseño de circuitos electrónicos de adaptación de la señal de salida del sensor de velocidad . . . . .	69
7.8	Selección de los equipos de alimentación del proyecto . . . . .	71
7.9	Disposición espacial de los elementos que conforman el sistema . . . . .	72
7.10	Programación software para el control del equipo . . . . .	74
8	RESULTADOS FINALES . . . . .	76
8.1	Elección de la disposición mecánica del sistema . . . . .	76
8.2	Selección del motor eléctrico . . . . .	77
8.3	Selección del variador de frecuencia [18] . . . . .	79
8.4	Elección y disposición del sensor de velocidad [19] . . . . .	82
8.4.1	Soporte y colocación del sensor . . . . .	83
8.5	Adaptación de la señal de salida del sensor . . . . .	87
8.5.1	Programación software para el acondicionamiento de la señal del sensor . . . . .	88
8.5.2	Circuito de adaptación de la señal PWM . . . . .	89
8.6	Diseño de las cargas del sistema . . . . .	90
8.7	Diseño de la tarjeta de adquisición de datos . . . . .	92
8.8	Diseño de la caja de protección . . . . .	93
8.9	Selección del material eléctrico auxiliar . . . . .	95
8.9.1	Sistema de marcha/paro . . . . .	96
8.9.2	Fuente de alimentación DC . . . . .	98
8.9.3	Interruptor magnetotérmico . . . . .	99
8.10	Sistemas de protección de los dispositivos eléctricos y electrónicos empleados . . . . .	100
8.10.1	Caja de protección del sistema de adquisición de datos (DAQ) . . . . .	101

8.10.2 Caja de protección general (alimentación DC + control + acondicionamiento codificador)	102
8.10.3 Carcasa de protección de los contactos del variador de frecuencia	104
8.10.4 Carcasa de protección del magnetotérmico	105
8.11 Disposición espacial de los diferentes elementos que intervienen en el sistema	106
8.12 Fabricación de las piezas 3D	107
8.13 Programación software del algoritmo de control para el correcto funcionamiento del banco de pruebas	108
8.13.1 Obtención de las constantes de ajuste del PID	110
8.13.2 Algoritmo de control PID	114
8.14 Montaje y puesta en marcha del sistema	117
8.15 Resultados obtenidos y conclusiones	122
9 ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS	125
III <b>ANEXOS</b>	127
Índice del documento Anexos	129
10 DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA	131
10.1 Propuesta inicial de asignación del TFG	131
11 CÁLCULOS	134
11.1 Cálculos relacionados con los circuitos de acondicionamiento de señales	134
11.1.1 Cálculo del circuito de filtrado y amplificación de la señal PWM de salida del Arduino UNO para el acondicionamiento del sensor	134
11.1.2 Cálculo del circuito de acondicionamiento de las señales de entrada y salida del DAQ	136
11.2 Cálculos relacionados con el dimensionado del magnetotérmico	138
11.3 Cálculo de los parámetros del regulador PID	139
12 OTROS ANEXOS	143
12.1 Características y configuración de pines del microcontrolador Arduino Uno [16] [21]	143
12.2 Diseño y análisis del algoritmo de adaptación de la señal del codificador de velocidad	146
12.3 Simulación de los circuitos electrónicos	148
12.3.1 Simulación del circuito de acondicionamiento del sensor	148
12.3.2 Simulación de los circuitos de acondicionamiento de las señales del DAQ	151
12.4 Parámetros de impresión 3D para la fabricación de las piezas que conforman el diseño	152
12.5 Funciones de Arduino empleadas en el algoritmo de la DAQ	158
12.6 Códigos de programación	158
12.6.1 Códigos de programación de Arduino UNO	158
12.6.2 Códigos de programación de Matlab	162

12.7 Manual de Usuario de la tarjeta de adquisición de datos (Arduino como DAQ)	170
<b>IV PLANOS</b>	175
Índice del documento Planos	177
Soporte disco imantado 20 C.P.R.	179
Protector del ventilador del motor y soporte del codificador	181
Soporte del conector del sensor	183
Soporte tuerca para el acople del soporte de conexión del sensor	185
Vista explosionada del soporte del sensor y conector	187
Caja DAQ	189
Tapa de la caja DAQ	191
Vista explosionada de la caja DAQ	193
Identificación de conectores caja DAQ	195
Caja general del sistema	197
Tapa de la caja general del sistema	199
Vista explosionada de la caja general del sistema	201
Identificación de conectores caja general	203
Acople del eje del motor a discos de carga	205
Discos de carga	207
Vista explosionada del acople y las cargas del sistema	209
Carcasa de protección de los contactos del variador de frecuencia	211
Identificación de conectores de la carcasa del variador de frecuencia	213
Carcasa de protección de los contactos del interruptor magnetotérmico	215
Puerta de la caja de protección	217
Parte fija delantera de la caja de protección	219
Parte trasera de la caja de protección	221
Lateral derecho de la caja de protección	223
Lateral izquierdo de la caja de protección	225
Tapa de la caja de protección	227
Vista explosionada de la caja de protección	229
Esquema general de conexión eléctrica de los módulos y dispositivos del sistema	231
Esquema de conexión eléctrica del DAQ	233
Esquema de conexión eléctrica de los dispositivos de la caja general del sistema	235
Esquema eléctrico de la placa de acondicionamiento de las señales del DAQ	237
Disposición de componentes de la placa de acondicionamiento de señales del DAQ	239
Footprint de la placa de acondicionamiento de señales del DAQ	241
Esquema eléctrico de la placa de acondicionamiento de la señal de velocidad	243
Disposición de componentes de la placa de acondicionamiento de la señal de velocidad	245
Footprint de la placa de acondicionamiento de la señal de velocidad	247
Esquema eléctrico de la placa de bornes de alimentación de la caja general	249
Disposición de componentes de la placa de bornes de alimentación de la caja general	251

Footprint de la placa de bornes de alimentación de la caja general . . . . .	253
<b>V PLIEGO DE CONDICIONES . . . . .</b>	<b>255</b>
Índice del documento Pliego de condiciones . . . . .	257
<b>VI MEDICIONES . . . . .</b>	<b>261</b>
Índice del documento Mediciones . . . . .	263
13 Banco de pruebas para motor trifásico . . . . .	265
13.1 Base y soporte del proyecto . . . . .	265
13.2 Dispositivos eléctricos y electrónicos del sistema . . . . .	265
13.3 Acondicionamiento de la señal del sensor y tarjeta de adquisición de datos . . .	266
13.4 Caja de protección . . . . .	267
13.5 Fabricación de piezas en 3D . . . . .	267
13.6 Conectores y cables . . . . .	269
13.7 Tornillería . . . . .	271
14 Licencias software . . . . .	272
15 Mano de obra . . . . .	273
<b>VII PRESUPUESTO . . . . .</b>	<b>275</b>
Índice del documento Presupuesto . . . . .	277
16 Banco de pruebas para motor trifásico . . . . .	279
16.1 Base y soporte del proyecto . . . . .	279
16.2 Dispositivos eléctricos y electrónicos del sistema . . . . .	279
16.3 Acondicionamiento de la señal del sensor y tarjeta de adquisición de datos . . .	280
16.4 Caja de protección . . . . .	280
16.5 Fabricación de piezas en 3D . . . . .	281
16.6 Conectores y cables . . . . .	281
16.7 Tornillería . . . . .	283
17 Licencias software . . . . .	284
18 Mano de obra . . . . .	285
19 Presupuesto total . . . . .	287





# Listado de figuras

3.1	Planta de control de temperatura . . . . .	27
3.2	Planta de control de nivel . . . . .	28
3.3	Planta de controles varios . . . . .	29
3.4	Motor eléctrico [25] . . . . .	30
3.5	Campo magnético en motor trifásico [26] . . . . .	31
3.6	Rotor en jaula de ardilla [27] . . . . .	32
3.7	Rotor devanado [27] . . . . .	32
3.8	Gráfica del par motor [28] . . . . .	33
3.9	Etapa de rectificación [28] . . . . .	34
3.10	Etapa de filtrado [28] . . . . .	34
3.11	Etapa inversora [28] . . . . .	35
3.12	Diagrama de bloque PID [29] . . . . .	37
7.1	Dispositivos hardware que intervienen en el banco de pruebas . . . . .	48
7.2	Motor+carga+sensor . . . . .	49
7.3	Carga + motor + sensor . . . . .	50
7.4	Sensor + carga + motor . . . . .	50
7.5	Formas constructivas de los motores [30] . . . . .	52
7.6	Motor trifásico con freno electromagnético [31] . . . . .	52
7.7	Motor trifásico con reductora [32] . . . . .	53
7.8	Señal de salida de un encoder de cuadratura [33] . . . . .	55
7.9	Funcionamiento encoders ópticos . . . . .	56
7.10	Funcionamiento encoder magnético incremental [36] . . . . .	56
7.11	Encoder absoluto modelo TBN 50-SA 2048R C2 S N14 . . . . .	57
7.12	Acoplamientos rígidos [37] . . . . .	58
7.13	Acople cardan [38] . . . . .	58
7.14	Acoplamientos flexibles [39] . . . . .	59
7.15	Diseño acoplamiento por correas . . . . .	60
7.16	Diseño de la rueda dentada . . . . .	61
7.17	Partes soporte y del sistema de tensión . . . . .	61
7.18	Motor acoplado a generador [40] . . . . .	63
7.19	Freno electromagnético [41] . . . . .	64
7.20	Acople con disco de carga . . . . .	64
7.21	Direcciones de proyección . . . . .	65

7.22	Direcciones de proyección . . . . .	66
7.23	Funcionalidad de la DAQ para el presente proyecto . . . . .	67
7.24	Esquema DAQ . . . . .	69
7.25	Posibles dispositivos de adaptación de la señal del encoder . . . . .	70
7.26	Disposición espacial de los elementos sobre el tablero . . . . .	70
7.27	Fuente de alimentación DC [45] . . . . .	71
7.28	Esquema simplificado de la alimentación del sistema . . . . .	72
7.29	Disposición espacial de los elementos sobre el tablero (Opción 1) . . . . .	73
7.30	Disposición espacial de los elementos sobre el tablero (Opción 2) . . . . .	73
7.31	Disposición espacial de los elementos sobre el tablero (Opción 3) . . . . .	74
7.32	Disposición espacial de los elementos sobre el tablero (Opción 4) . . . . .	74
8.1	Vista general del motor [46] . . . . .	77
8.2	Placa de características del motor . . . . .	78
8.3	Parte trasera del motor . . . . .	79
8.4	Eje delantero del motor seleccionado . . . . .	79
8.5	Variador de frecuencia ATV312H075M2 [18] . . . . .	81
8.6	Esquemas de conexión del variador . . . . .	81
8.7	Codificador magnético Pololu [19] . . . . .	82
8.8	Señal de salida del encoder magnético 20 C.P.R. . . . .	83
8.9	Diseño inicial del soporte del sensor . . . . .	84
8.10	Diseño del soporte del disco imantado . . . . .	85
8.11	Diseño de la carcasa de protección del ventilador y soporte de sensor . . . . .	85
8.12	Conector 4 pines macho [47] . . . . .	86
8.13	Soporte para la conexión del sensor . . . . .	86
8.14	Soporte para la tuerca de fijación . . . . .	86
8.15	Conjunto protector + soporte conexión . . . . .	87
8.16	Plano detalle del soporte de conexión . . . . .	87
8.17	Diagrama de bloques de la programación para la adaptación de la señal . . . . .	88
8.18	Circuito de adaptación de la señal de salida del Arduino . . . . .	89
8.19	Conjunto acople y cargas . . . . .	90
8.20	Despiece cargas y acople del motor . . . . .	91
8.21	Circuito de acondicionamiento de la señal de entrada DAQ . . . . .	92
8.22	Escuadras . . . . .	94
8.23	Diseño de la caja de protección . . . . .	94
8.24	Renderizado del diseño de la caja de protección . . . . .	94
8.25	Bisagras con fijación [56] . . . . .	95
8.26	Posición del motor en la caja . . . . .	95
8.27	Sistema de control Marcha/Paro . . . . .	96
8.28	Módulo temporizador [49] . . . . .	97
8.29	Seta de emergencia [50] . . . . .	97
8.30	Final de carrera [51] . . . . .	98

8.31	Fuente de alimentación seleccionada [45]	99
8.32	Magnetotérmico 10 A [52]	100
8.33	Prensaestopa [55]	101
8.34	Conectores banana 4 mm	101
8.35	Conector 4 pines macho [47]	101
8.36	Disposición de los dispositivos DAQ en la caja	102
8.37	Diseño caja protectora DAQ	102
8.38	Diseño caja general	103
8.39	Disposición de los dispositivos en la caja general	103
8.40	Disposición de la seta de emergencia sobre la tapa	104
8.41	Diseño de la carcasa del variador de frecuencia	104
8.42	Disposición de la carcasa del variador de frecuencia	105
8.43	Diseño de la carcasa del interruptor magnetotérmico	105
8.44	Disposición de la carcasa del interruptor magnetotérmico	106
8.45	Diseño completo del sistema (Vista 1)	107
8.46	Diseño completo del sistema (Vista 2)	107
8.47	Diagrama de bloques del sistema de control del banco de pruebas	109
8.48	Diagrama de bloques del método Relay-Feedback [4]	111
8.49	Histéresis del relé para la ejecución del método Relay-Feedback [4]	111
8.50	Gráfica obtenida en la salida del sistema con <i>Relay-Feedback</i> [4]	112
8.51	Diagrama de bloques de la programación para la ejecución del método Relay-Feedback	113
8.52	Diagrama de bloques de la programación para la ejecución del algoritmo de control PID	115
8.53	Ventana emergente para la selección del regulador	116
8.54	Placa del circuito de adaptación de señales de la DAQ	117
8.55	Soporte y conexión del codificador de velocidad	118
8.56	Montaje de la caja de protección	118
8.57	Montaje de la caja general del sistema	119
8.58	Montaje de la caja DAQ del sistema	119
8.59	Montaje del variador de frecuencia e interruptor magnetotérmico	119
8.60	Montaje del banco de pruebas para motor trifásico	120
8.61	Conexión triángulo bornes del motor	122
8.62	Regulación del sistema con regulador PID	123
8.63	Regulación del sistema con regulador PI	123
8.64	Regulación del sistema con regulador P	124
11.1	Filtro pasivo paso bajo primer orden	134
11.2	Circuito amplificador no inversor	135
11.3	Divisor de tensión	136
11.4	Conexión divisor de tensión con Arduino	137
11.5	Gráfica obtenida con el <i>Relay-Feedback</i>	139

11.6	Gráfica obtenida con regulador PID con los parámetros de Ziegler-Nichols . . .	140
11.7	Gráfica obtenida con regulador PI con los parámetros de Ziegler-Nichols . . .	141
11.8	Gráfica obtenida con regulador PID con ajuste fino de sus parámetros . . . . .	142
11.9	Gráfica obtenida con regulador PI con ajuste fino de sus parámetros . . . . .	142
11.10	Gráfica obtenida con regulador P con ajuste fino de sus parámetros . . . . .	143
12.1	Señal PWM [48] . . . . .	145
12.2	Circuito simulación Bode filtro paso bajo . . . . .	148
12.3	Bode de módulo del filtro paso bajo . . . . .	148
12.4	Circuito simulación análisis transitorio del filtro paso bajo . . . . .	149
12.5	Gráfica de la señal de entrada y salida del filtro paso bajo . . . . .	149
12.6	Gráfica de transformada de Fourier de la señal de entrada y salida del filtro paso bajo . . . . .	149
12.7	Circuito simulación análisis transitorio del amplificador no inversor . . . . .	150
12.8	Gráfica de la señal de entrada y salida del circuito de amplificación . . . . .	150
12.9	Circuito simulación filtrado + amplificación . . . . .	151
12.10	Gráficas del circuito de simulación filtrado + amplificación . . . . .	151
12.11	Circuito simulación divisor de tensión . . . . .	152
12.12	Gráficas de la corriente y tensión de salida del divisor de tensión . . . . .	152
12.13	Identificación del puerto serie con Arduino IDE . . . . .	172
12.14	Identificación del puerto serie con Matlab . . . . .	172
12.15	Configuración de los parámetros de comunicación . . . . .	173

# Listado de tablas

7.1	Datos de partida del motor del equipo . . . . .	50
7.2	Datos de partida del variador de frecuencia . . . . .	53
7.3	Modelos de variadores de frecuencia . . . . .	54
7.4	Tipos de montaje de los encoders . . . . .	57
7.5	Datos de partida para la selección del acople . . . . .	59
7.6	Encoders magnéticos . . . . .	62
7.7	Características posibles DAQ's . . . . .	68
8.1	Características del motor seleccionado [17] . . . . .	78
8.2	Características del variador seleccionado [18] . . . . .	80
8.3	Características del codificador seleccionado [19] . . . . .	82
8.4	Características fuente de alimentación seleccionada . . . . .	99
12.1	Características Arduino Uno Rev 3 [16] . . . . .	144
12.2	Parámetros de impresión para la fabricación del soporte del imán del sensor .	153
12.3	Parámetros de impresión para la fabricación de la carcasa de ventilación del motor . . . . .	153
12.4	Parámetros de impresión para la fabricación del soporte del conector 4 pines .	154
12.5	Parámetros de impresión para la funda de la tuerca . . . . .	154
12.6	Parámetros de impresión para la caja DAQ . . . . .	155
12.7	Parámetros de impresión para la tapa de la caja DAQ . . . . .	155
12.8	Parámetros de impresión de la caja general . . . . .	156
12.9	Parámetros de impresión para la tapa de la caja general . . . . .	156
12.10	Parámetros de impresión para la carcasa de protección del variador de frecuencia . . . . .	157
12.11	Parámetros de impresión para la carcasa de protección del interruptor magnético . . . . .	157
13.1	Lista de mediciones de base y soporte del sistema . . . . .	265
13.2	Lista de mediciones de dispositivos eléctricos y electrónicos del sistema . . . .	266
13.3	Lista de mediciones para el acondicionamiento de la señal del sensor y tarjeta de adquisición de datos . . . . .	266
13.4	Lista de mediciones para la caja de protección . . . . .	267
13.5	Lista de mediciones para la fabricación de piezas en 3D . . . . .	268
13.6	Lista de mediciones para los conectores y cables empleados en el proyecto . .	271

13.7	Lista de mediciones para el acondicionamiento de la señal del sensor y tarjeta de adquisición de datos . . . . .	272
14.1	Lista de las mediciones de software . . . . .	272
15.1	Lista de mediciones de mano de obra . . . . .	273
16.1	Lista de precios para la base y soporte del proyecto . . . . .	279
16.2	Lista de precios para los dispositivos eléctricos y electrónicos del sistema . . .	279
16.3	Lista de precios para el acondicionamiento de la señal del sensor y tarjeta de adquisición de datos . . . . .	280
16.4	Lista de precios para la fabricación de la caja de protección . . . . .	281
16.5	Lista de precios para la fabricación de las piezas en 3D . . . . .	281
16.6	Lista de precios de los conectores y cables empleados en el proyecto . . . . .	283
16.7	Lista de precios para la tornillería . . . . .	284
17.1	Lista de precios de las licencias de software . . . . .	285
18.1	Lista de precios de la mano de obra . . . . .	286
19.1	Listado de precios totales . . . . .	287

# Listado de códigos de programación

12.1	Código para el Arduino de acondicionamiento de la señal de salida del codificador magnético . . . . .	159
12.2	Código para el empleo del microcontrolador Arduino como DAQ . . . . .	160
12.3	DAQ_Start . . . . .	162
12.4	DAQ_Stop . . . . .	163
12.5	DAQ_Read . . . . .	163
12.6	DAQ_Write . . . . .	164
12.7	Función <i>Relay-Feedback</i> . . . . .	165
12.8	Función <i>graficar</i> . . . . .	166
12.9	Función <i>calculocoeficientes</i> . . . . .	166
12.10	Función <i>Algoritmo_Control</i> . . . . .	166
12.11	Función <i>Algoritmo_Control_Vector</i> . . . . .	168





**TÍTULO: BANCO DE PRUEBAS PARA MONITORIZACIÓN Y CONTROL  
DE MOTOR TRIFÁSICO**

---

# **MEMORIA**

---

**PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

**AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N**

**15405 - FERROL**

**FECHA: JUNIO DE 2020**

**AUTOR: EL ALUMNO**

**Fdo.: ÁLVARO MICHELENA GRANDÍO**



## Índice del documento MEMORIA

<b>1</b>	<b>OBJETO</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>ALCANCE</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	<b>27</b>
3.1	Plantas de control del Laboratorio de Optimización y Control . . . . .	27
3.1.1	Planta de control de temperatura . . . . .	27
3.1.2	Planta de control de nivel . . . . .	28
3.1.3	Planta de controles varios . . . . .	28
3.2	Motor eléctrico [2] . . . . .	29
3.2.1	Motor trifásico asíncrono . . . . .	30
3.3	Variadores de frecuencia [8] [7] . . . . .	32
3.4	Regulador PID [1] . . . . .	35
3.4.1	Acción proporcional (P) [1] . . . . .	35
3.4.2	Acción integral (I) [1] . . . . .	36
3.4.3	Acción derivativa (D) [1] . . . . .	36
<b>4</b>	<b>NORMAS Y REFERENCIAS</b>	<b>38</b>
4.1	Disposiciones legales y normas aplicadas . . . . .	38
4.2	Bibliografía . . . . .	38
4.3	Software empleado . . . . .	38
4.3.1	Software de diseño gráfico . . . . .	38
4.3.2	Software para impresión 3D . . . . .	38
4.3.3	Software de diseño y simulación de circuitos electrónicos . . . . .	38
4.3.4	Software de diseño de circuitos impresos . . . . .	38
4.3.5	Software de programación . . . . .	39
4.3.6	Software de edición de texto . . . . .	39
4.3.7	Software para esquemas y diagramas . . . . .	39
4.4	Otras referencias . . . . .	39
4.5	Referencias gráficas . . . . .	41
<b>5</b>	<b>DEFINICIONES Y ABREVIATURAS</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>REQUISITOS DE DISEÑO</b>	<b>46</b>
6.1	Requisitos de diseño del banco de pruebas . . . . .	46
6.2	Requisitos de funcionalidad del sistema . . . . .	46
6.3	Requisitos de hardware . . . . .	47
6.4	Requisitos de software . . . . .	47
6.5	Requisitos de alimentación del proyecto . . . . .	47

<b>7</b>	<b>ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES</b>	<b>48</b>
7.1	Diseño mecánico del sistema . . . . .	49
7.2	Estudio de las alternativas presentes en el mercado, para la selección del motor empleado . . . . .	50
7.3	Estudio de los diferentes variadores de frecuencia comerciales . . . . .	53
7.4	Selección de sensores empleados para medir de la velocidad de rotación del motor [10] . . . . .	54
7.4.1	Tipos de sensores de velocidad . . . . .	54
7.4.2	Tipos de montaje de los encoders . . . . .	56
7.4.3	Clasificación de los acoples . . . . .	58
7.4.4	Diseño de sistemas alternativos para el acople de ejes . . . . .	60
7.4.5	Selección del encoder magnético . . . . .	62
7.5	Análisis de los diferentes tipos de cargas para acoplar al motor . . . . .	63
7.6	Análisis y diseño de los sistemas y elementos de protección . . . . .	65
7.7	Diseño de circuitos electrónicos de adaptación de señales y Tarjeta de Adquisi- ción de Datos . . . . .	67
7.7.1	Tarjeta de Adquisición . . . . .	67
7.7.2	Diseño de circuitos electrónicos de adaptación de la señal de salida del sensor de velocidad . . . . .	69
7.8	Selección de los equipos de alimentación del proyecto . . . . .	71
7.9	Disposición espacial de los elementos que conforman el sistema . . . . .	72
7.10	Programación software para el control del equipo . . . . .	74
<b>8</b>	<b>RESULTADOS FINALES</b>	<b>76</b>
8.1	Elección de la disposición mecánica del sistema . . . . .	76
8.2	Selección del motor eléctrico . . . . .	77
8.3	Selección del variador de frecuencia [18] . . . . .	79
8.4	Elección y disposición del sensor de velocidad [19] . . . . .	82
8.4.1	Soporte y colocación del sensor . . . . .	83
8.5	Adaptación de la señal de salida del sensor . . . . .	87
8.5.1	Programación software para el acondicionamiento de la señal del sensor	88
8.5.2	Circuito de adaptación de la señal PWM . . . . .	89
8.6	Diseño de las cargas del sistema . . . . .	90
8.7	Diseño de la tarjeta de adquisición de datos . . . . .	92
8.8	Diseño de la caja de protección . . . . .	93
8.9	Selección del material eléctrico auxiliar . . . . .	95
8.9.1	Sistema de marcha/paro . . . . .	96
8.9.2	Fuente de alimentación DC . . . . .	98
8.9.3	Interruptor magnetotérmico . . . . .	99
8.10	Sistemas de protección de los dispositivos eléctricos y electrónicos empleados .	100
8.10.1	Caja de protección del sistema de adquisición de datos (DAQ) . . . . .	101

8.10.2 Caja de protección general (alimentación DC + control + acondicionamiento codificador) . . . . .	102
8.10.3 Carcasa de protección de los contactos del variador de frecuencia . . . .	104
8.10.4 Carcasa de protección del magnetotérmico . . . . .	105
8.11 Disposición espacial de los diferentes elementos que intervienen en el sistema .	106
8.12 Fabricación de las piezas 3D . . . . .	107
8.13 Programación software del algoritmo de control para el correcto funcionamiento del banco de pruebas . . . . .	108
8.13.1 Obtención de las constantes de ajuste del PID . . . . .	110
8.13.2 Algoritmo de control PID . . . . .	114
8.14 Montaje y puesta en marcha del sistema . . . . .	117
8.15 Resultados obtenidos y conclusiones . . . . .	122
<b>9 ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS</b>	<b>125</b>



## 1 OBJETO

El presente trabajo fin de grado tiene como objeto tanto el diseño (hardware y software), como el montaje, de un banco de pruebas para el control de velocidad de un motor trifásico al cual se le puedan aplicar distintas cargas.

Este banco de pruebas complementará a las diferentes plantas de control del laboratorio de Optimización y Control de la Escuela Universitaria Politécnica, y tendrá como finalidad la realización de prácticas de control por el alumnado de dicha escuela, por lo que se buscará un diseño robusto, modular y económico con el objetivo de que estas plantas puedan ser replicadas.

## 2 ALCANCE

El alcance del presente proyecto se puede dividir en 7 etapas, las cuales se enumeran a continuación:

- Estudio y documentación pormenorizada de las diferentes posibilidades para los objetivos propuestos.
- Definición de los diferentes materiales que se usarán, realizando un pormenorizado análisis de las soluciones.
- Estudio y documentación detallados de la configuración y uso de la tarjeta de adquisición de datos. Se ha de generar un Manual de Usuario.
- Montaje del sistema.
- Programación de un lazo de control tipo PID de control de velocidad.
- Se deberá de contemplar en el diseño la posibilidad de añadir diferentes cargas al motor.
- Realización de pruebas de manejo y monitorización.



### 3 ANTECEDENTES

#### 3.1. Plantas de control del Laboratorio de Optimización y Control

Este proyecto surge con el objetivo de aumentar la oferta de plantas de control disponibles en el Laboratorio de Optimización y Control, de la Escuela Universitaria Politécnica. Este laboratorio ya estaba equipado con diferentes plantas de nivel, así como, plantas de control de temperatura, o una planta en la que se pueden controlar diferentes parámetros, que le sirven al alumnado de la escuela para realizar prácticas de control, en sistemas muy habituales en el ámbito industrial.

##### 3.1.1. Planta de control de temperatura

Como ya se comentó anteriormente, uno de los sistemas de control que hay en el laboratorio de Optimización y Control de la escuela, es la planta de control de temperatura, que es empleada por el alumnado para realizar ejercicios de regulación y control de temperatura.

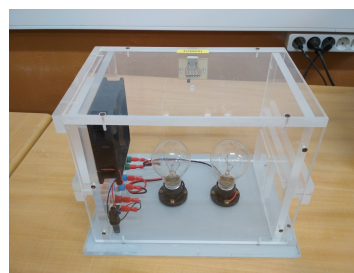
Este sistema está compuesto por una caja de metacrilato, que simula el interior de un horno, en donde se albergan dos bombillas incandescentes, empleadas como elemento calefactor. Además, dicho sistema también incluye un ventilador DC que se sitúa pegado a uno de los laterales de la caja en donde se encuentra una pequeña compuerta, empleada para que el ventilador pueda intercambiar aire del interior del sistema con aire del exterior para enfriarlo o para provocar perturbaciones, siempre y cuando dicha compuerta esté abierta.

Para obtener el valor de la temperatura en el interior de la caja se emplea un sensor de temperatura LM35, cuya señal es acondicionada para ser enviada, por medio de un cable de red UTP, al DAQ.

En esta planta la DAQ empleada es una NI USB-6008 (12 bits) del fabricante National Instruments.



(a) Vista frontal



(b) Vista lateral

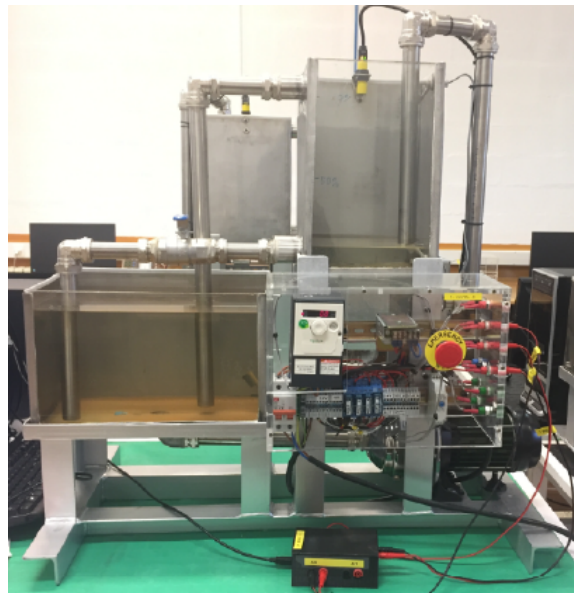
**Figura 3.1** – Planta de control de temperatura

### 3.1.2. Planta de control de nivel

Como propiamente indica su nombre, esta planta se emplea para controlar el nivel de agua, en un depósito. Para ello, la planta está compuesta por dos tanques a distintas alturas. El tanque inferior es el que alimenta a la bomba centrífuga, la cual, bombea el agua hasta el tanque superior, sobre el que se efectúa el control de nivel. Para detectar la altura de la columna de agua del depósito superior se emplea un sensor de ultrasonidos S18UUA de la marca Banner.

Además, el tanque superior está conectado al depósito inferior a través de un tubo, controlado por una llave de paso manual o una válvula servopilotada, con el que se regula la descarga de agua y se añaden perturbaciones al sistema.

Como elemento de control, estas plantas emplean un variador de velocidad Altivar312-ATV312H075M2 de la casa Schneider, y como DAQ se emplea un Arduino Uno (en una de ellas se emplea una DAQ de la casa National Instruments).



**Figura 3.2** – Planta de control de nivel

### 3.1.3. Planta de controles varios

Esta planta de controles varios está equipada con diferentes actuadores (bomba centrífuga, calentador, válvulas servopilotadas y electroválvulas) y sensores, tanto de temperatura, como de presión y de nivel, además de un caudalímetro, con los que el alumno puede realizar diferentes lazos de control (caudal, presión, nivel o temperatura) y generar diferentes tipos de perturbaciones en los diversos procesos.

Esta planta emplea un PLC, basado en un autómata TSX Premiun, como elemento de control de todo el sistema.



**Figura 3.3** – Planta de controles varios

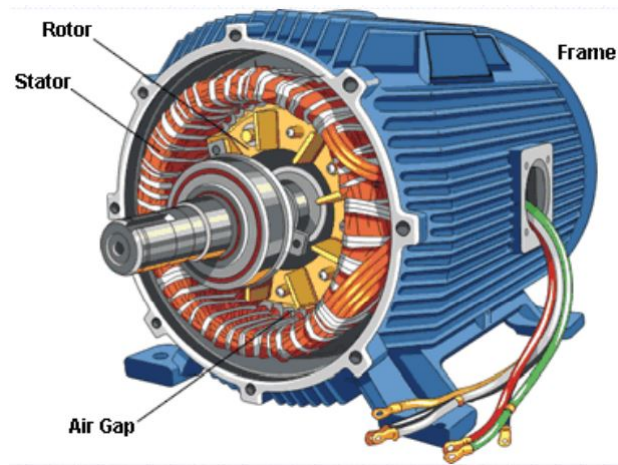
## 3.2. Motor eléctrico [2]

El motor eléctrico es una máquina eléctrica que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Esta transformación de energía se produce por medio de la interacción de los campos magnéticos generados en el interior del motor.

Los motores eléctricos están compuestos por dos partes, una parte fija llamada estator, y una parte móvil conocida como rotor. En ambas partes se sitúan materiales ferromagnéticos en los que frecuentemente se disponen ciertas ranuras para albergar los devanados eléctricos.

Atendiendo al tipo de alimentación que presentan, podemos encontrarnos con varios tipos de motores:

- **Motores de corriente continua (DC):** emplean una fuente de corriente continua para generar el campo magnético y en consecuencia el movimiento mecánico.
- **Motores de corriente alterna (AC):** son aquellos motores que emplean una fuente de corriente alterna para producir trabajo. Debido a la sencillez de su construcción y a que el suministro eléctrico se lleva a cabo empleando corriente alterna, estos motores son los más empleados en el ámbito industrial.



**Figura 3.4 – Motor eléctrico [25]**

Dentro de los motores de corriente alterna, podemos diferenciar, tanto motores síncronos, en los que la velocidad del rotor y la velocidad del campo magnético del estator son iguales, como motores asíncronos, en los que la velocidad de sincronismo es ligeramente superior a la velocidad del rotor.

También se pueden diferenciar los motores AC, en cuanto al tipo de alimentación que presentan. Así pues, podemos diferenciar motores trifásicos y motores monofásicos.

- **Motor monofásico:** estos motores emplean corriente alterna de una única fase. Este tipo de motores presentan grandes dificultades a la hora de arrancar, por lo que, disponen de devanados auxiliares de arranque, conectados a condensadores con los que desfazar la señal de alimentación [5].
- **Motor trifásico:** emplean como alimentación corriente alterna de tres fases. A diferencia de los motores monofásicos, este tipo de motores no presentan problemas en el arranque ya que aprovechan el desfase entre las fases de alimentación.

Dentro de los diferentes tipos de motores, hoy en día, en el ámbito industrial, es muy habitual encontrar motores trifásicos asíncronos. Esto se debe, a que estos presentan ciertas ventajas sobre los otros tipos de motores, tanto trifásicos síncronos, como el resto de los motores AC monofásicos. Algunas de estas ventajas son:

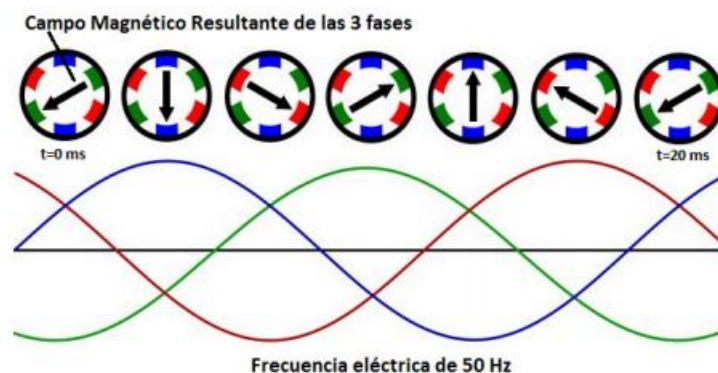
- Escaso mantenimiento, debido a su simplicidad de diseño.
- Coste reducido con respecto al resto de motores.
- Motores robustos, aptos para operar en diversos procesos con amplios requerimientos de potencia.

### 3.2.1. Motor trifásico asíncrono

Para proceder a explicar el funcionamiento del motor trifásico es de importante necesidad conocer cómo se compone el sistema trifásico.

El sistema trifásico es un sistema de distribución de energía eléctrica conformada por tres fases, más el neutro. Estas fases presentan la misma frecuencia y amplitud, pero por el contrario, fases diferentes, de tal forma que, cada una de estas líneas, presenta un desfase de  $120^\circ$  grados respecto de las otras fases.

En los motores trifásicos, este desfase es empleado para producir el movimiento giratorio, de tal manera, que, cada una de las fases, está conectada a diferentes devanados que se sitúan enfrentados entre sí dentro del estator, por lo que, los campos magnéticos producidos en cada una de las bobinas, están desfasados respecto al anterior. Este desfase de campos magnéticos genera una suma de vectores cuya resultante gira en el espacio.



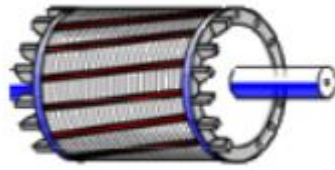
**Figura 3.5 – Campo magnético en motor trifásico [26]**

Como se puede observar, el empleo de corriente trifásica en motores eléctricos sirve de gran ayuda, puesto que, el propio desfase entre las diferentes líneas, evita que sea necesario emplear sistemas auxiliares, como condensadores, frecuentemente empleados en sistemas monofásicos para desfasar  $90^\circ$  la línea de alimentación, y así poder generar el desfase entre campos magnéticos.

Por otra parte, y atendiendo al diseño del rotor, podemos diferenciar motores con rotor con jaula de ardilla y motores con rotor devanado.

#### ■ Motores con rotor en jaula de ardilla.

Este tipo de motores se caracteriza porque su rotor está compuesto de un conjunto de barras conductoras, de cobre o aluminio, conectadas entre sí por sus extremos, cortocircuitando de esta manera los anillos que forman la jaula. Con este tipo de montaje se logra que el movimiento entre el campo magnético, generado por el devanado del estator, y el rotor, generen una corriente eléctrica en el devanado del rotor que reacciona al campo magnético y genera el movimiento.

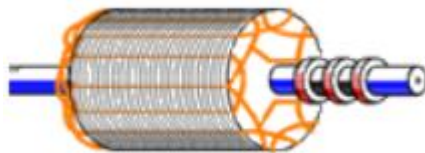


**Figura 3.6** – Rotor en jaula de ardilla [27]

La principal ventaja de estos motores es que el rotor no necesita de contacto eléctrico, por lo que no necesita elementos de conexión más que los propios rodamientos de sujeción, evitando de este modo piezas, como escobillas, de fácil desgaste. Por este motivo su uso en el ámbito industrial está muy extendido.

■ **Motores con rotor devanado.**

Este tipo de motores se identifican porque su rotor está compuesto por un devanado trifásico de cobre o aluminio, conectado en estrella por uno de sus extremos. Los otros extremos del devanado van conectados a un conjunto de anillos por los que se introduce la corriente eléctrica, empleando para ello unas escobillas. Al contrario que los motores de jaula de ardilla, este tipo de motores sí que necesitan de contacto eléctrico entre la alimentación y el rotor, por este motivo estos requieren un mayor mantenimiento respecto de los que presentan un rotor de jaula de ardilla.



**Figura 3.7** – Rotor devanado [27]

### 3.3. Variadores de frecuencia [8] [7]

Los variadores de frecuencia, también conocidos como variadores de velocidad, son dispositivos de regulación muy empleados en el ámbito industrial para llevar a cabo tareas de control en motores de corriente alterna.

Estos dispositivos se sitúan entre la alimentación y el motor eléctrico y se emplean para controlar la velocidad de giro de los motores AC, aunque también son capaces de realizar diferentes tareas como:

- Control del sentido de giro.
- Control de las rampas de aceleración y deceleración reduciendo picos de intensidad, prolongando así, la vida útil del motor.



- Protección del motor.
- Conversión de CA monofásica a CA trifásica.

Para regular la velocidad, estos dispositivos varían tanto la frecuencia, como el voltaje de la corriente eléctrica suministrada al motor, entregando únicamente la energía eléctrica necesaria, aumentando considerablemente, la eficiencia del sistema.

De esta manera, si se considera la ecuación de la velocidad de sincronismo de un motor AC, se puede observar como la velocidad de un motor depende de la frecuencia de la señal de alimentación.

$$r.p.m. = \frac{120 \cdot f}{n^{\circ} \text{ de polos}} \quad (3.1)$$

Siendo  $f$  frecuencia.

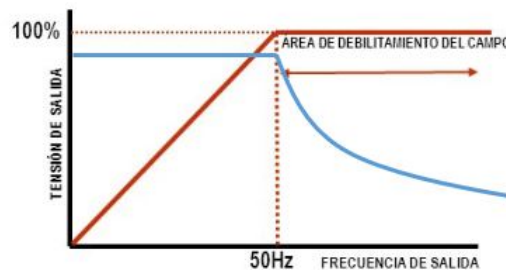
Es importante remarcar que, la velocidad a la que hace referencia la ecuación 3.1, es la velocidad de sincronismo, por lo que, en los motores asíncronos, la velocidad de rotación del rotor será ligeramente inferior a esta debido al deslizamiento.

Además, empleando la ley de ohm, desarrollada para una carga RL:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X_l^2}} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (2\pi f)^2}} \quad (3.2)$$

Siendo  $f$  frecuencia,  $R$  resistencia y  $V$  voltaje.

Podemos observar cómo al aumentar la frecuencia de la señal de alimentación del motor, la impedancia del propio bobinado de este aumentaría, por lo que, la corriente disminuiría, produciendo una caída en el par desenvuelto. De esta manera el variador también modifica el voltaje de salida, para mantener de forma constante, el par generado por el motor, de tal forma que, al aumentar la frecuencia de la señal de alimentación, dentro de los rangos de operatividad del motor, también se aumenta el voltaje de dicha señal [6].

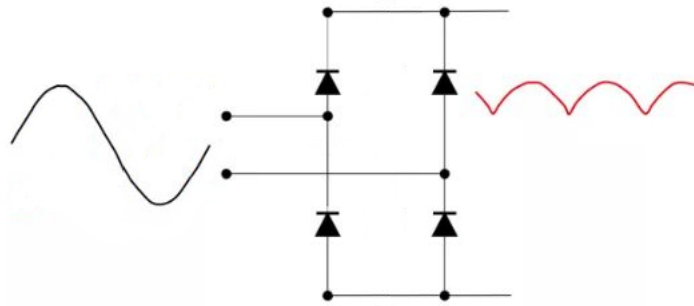


**Figura 3.8** – Gráfica del par motor [28]

Como se puede observar en la gráfica, Figura 3.8, al mantener una relación lineal entre tensión y frecuencia, línea de color marrón, el par del motor, línea de color azul, permanece constante. No obstante, al superar la frecuencia de red, punto en el que el variador emite la máxima tensión de suministro, el par comenzaría a descender como consecuencia de aumentar la frecuencia sin aumentar la tensión de alimentación.

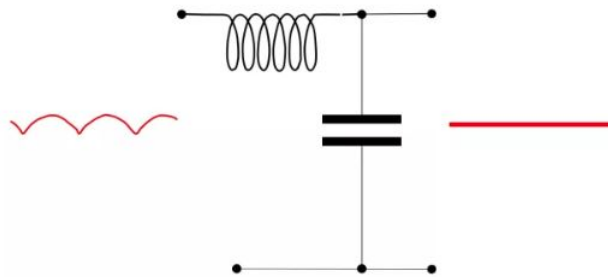
Para poder regular la frecuencia y el voltaje de la señal de salida, estos dispositivos emplean diferentes etapas de regulación sobre la señal de alimentación.

1. **Etapla rectificadora [8]:** el primer proceso que se lleva a cabo en un variador de frecuencia es la rectificación de la señal monofásica de alimentación, empleando para ello un puente de diodos (rectificador monofásico de onda completa).



**Figura 3.9** – Etapa de rectificación [28]

2. **Etapla de filtrado [8]:** la segunda etapa corresponde con el filtrado de la señal de salida del rectificador, para eliminar el rizado de dicha señal, empleando para ello filtros LC. A la salida de estos filtros se obtendrá una señal DC con un bajo rizado.

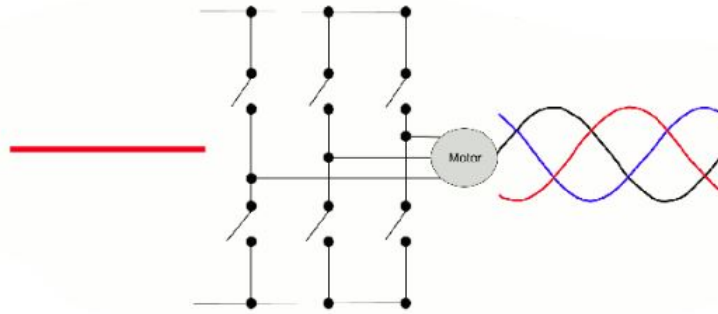


**Figura 3.10** – Etapa de filtrado [28]

Además de eliminar el rizado, estos filtros también reducen la emisión de armónicos a la red.

3. **Etapla inversora [8]:** una vez se ha obtenido tensión continua, se utilizará un inversor para obtener las señales alternas de frecuencia y tensión variables, necesarias para alimentar al motor. Esta etapa emplea la modulación PWM, empleando para ello, transistores IGBT accionados por un circuito de control.





**Figura 3.11** – Etapa inversora [28]

La señal de salida de esta etapa no es una onda senoidal perfecta, sino que esta, se corresponde con una onda de pulsos típica de los sistemas que emplean modulación PWM.

Además de la tensión de salida de alimentación del motor AC, el variador facilita ciertas tensiones DC auxiliares, muy limitadas en corriente, empleadas en circuitos de control.

### 3.4. Regulador PID [1]

Los reguladores son los componentes más importantes dentro de un sistema de control automático realimentado, cuyo objetivo principal, es el de ajustar las señales enviadas a los elementos de control para obtener a la salida del sistema una señal lo más cercana posible a la consigna o set-point, intentando minimizar el efecto de los posibles errores o perturbaciones que presenten dichos sistemas.

Los reguladores PID, están compuestos por tres acciones de control bien definidas: acción proporcional (P), acción integral (I) y acción derivativa (D).

#### 3.4.1. Acción proporcional (P) [1]

La acción proporcional consiste en la amplificación de la señal del error por medio de un valor de ganancia,  $K_p$ :

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (3.3)$$

Con  $e(t)$ , error de posición del sistema.

Un valor alto de la ganancia, disminuirá el error, mejorando el régimen permanente y la precisión del sistema, pero, por el contrario, puede introducir una mayor oscilación al sistema, empeorando el régimen transitorio. En cambio, si se emplea un valor muy bajo de dicha ganancia, ocurrirá lo contrario.

### 3.4.2. Acción integral (I) [1]

La acción integral es la encargada de eliminar el error de posición del sistema, ya que se basa en integrar la señal del error.

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt \quad (3.4)$$

Con  $T_i$ , constante de integración.

Esta acción añade un polo en cadena abierta en el origen, o lo que es lo mismo, un polo en  $z = 1$ , en el plano Z, sistema discreto. Al añadir el polo, el tipo de sistema aumenta, lo que produce un aumento de la inestabilidad, empeorando el régimen transitorio.

### 3.4.3. Acción derivativa (D) [1]

La acción derivativa se encarga de obtener una salida proporcional a la derivada del error. Es decir, esta acción, analiza la tendencia de la señal de error para anticiparse a valores de errores futuros.

En el caso de que el error sea constante, esta acción no tendrá ningún efecto sobre el sistema.

$$u(t) = T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5)$$

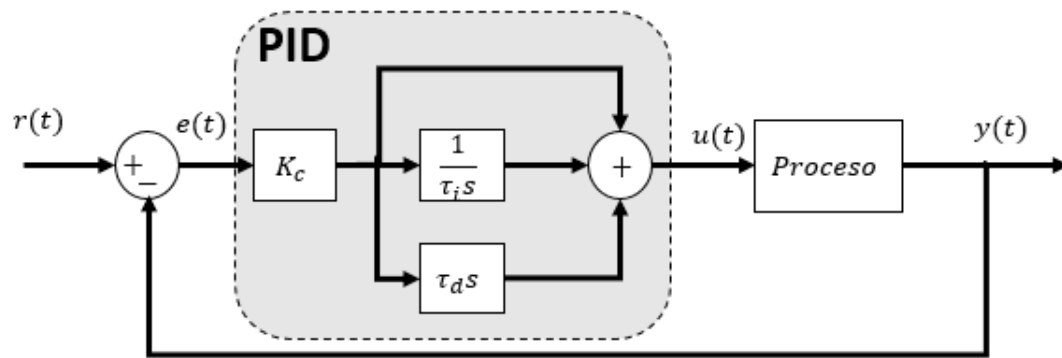
Con  $T_d$ , constante de derivación.

Esta acción derivativa corresponde a añadir un cero. Debido a su respuesta frecuencial, la acción derivativa aplica grandes valores de ganancia a altas frecuencias, generando inestabilidad. Además, en sistemas donde la variación del error es brusca, puede llegar a saturar los actuadores.

Estas tres acciones se pueden combinar, en función de la naturaleza del proceso a controlar, por lo que se pueden encontrar reguladores P,PI,PID y, en menor medida, reguladores PD.

El regulador PID se caracteriza por emplear las tres acciones anteriormente explicadas. Matemáticamente, este regulador se puede expresar:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.6)$$



**Figura 3.12** – Diagrama de bloque PID [29]

## 4 NORMAS Y REFERENCIAS

### 4.1. Disposiciones legales y normas aplicadas

Normativa establecida por la Escuela Universitaria Politécnica para la elaboración de los Trabajos de Fin de Grado (TFG) en las titulaciones de Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática y Grado en Ingeniería Eléctrica.

### 4.2. Bibliografía

- [1] OLIVER CHARLÓN, F.C.; *Teoría abreviada y problemas resueltos de Sistemas Lineales de Control*, Ferrol, Servicios de Reprografía Universidad de A Coruña, (1998), págs. 269-287.
- [2] VALENZUELA CERÓN, J.E.; *Manual de tipos de motores eléctricos, reconocimiento y sus aplicaciones en la industria*, Quito, Tesis de Licenciatura, 2013.
- [3] QUILODRA, V.; MORENO, P. R.; MARCHAN, L. C.; *Acoplamientos mecánicos*, Chile, Universidad Tecnológica de Chile, 2005.
- [4] CALVO ROLLE, J. L.; *Ajuste empírico de reguladores PID*, Ferrol, Universidad de A Coruña.

### 4.3. Software empleado

En este apartado se hace referencia, de manera pormenorizada, a los múltiples programas utilizados en la realización del proyecto.

#### 4.3.1. Software de diseño gráfico

- Autodesk Fusion 360 2019.
- Autodesk AutoCAD 2016.

#### 4.3.2. Software para impresión 3D

- Repetier-Host V2.1.6.

#### 4.3.3. Software de diseño y simulación de circuitos electrónicos

- Orcad Capture CIS 17.2 2016.

#### 4.3.4. Software de diseño de circuitos impresos

- KiCad 5.0.2.

#### 4.3.5. Software de programación

- Arduino IDE 1.8.11.
- MathWorks Matlab 2017a.

#### 4.3.6. Software de edición de texto

- Overleaf (Latex).

#### 4.3.7. Software para esquemas y diagramas

- Microsoft Office 365 ProPlus: PowerPoint.

### 4.4. Otras referencias

- [5] *Motor eléctrico*. [en línea], Solerpalau, [Fecha de la consulta: 10 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/motor-monofasico/>
- [6] *Relación voltaje-frecuencia en motores AC*. [en línea], Monografías, [Fecha de la consulta: 10 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos105/produccion-torque-con-variador-y-motor-a-c/produccion-torque-con-variador-y-motor-a-c.shtml>
- [7] *Funcionamiento de variadores de frecuencia*. [en línea], Cursosaula21, [Fecha de la consulta: 14 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.cursosaula21.com/que-es-variador-de-frecuencia/>
- [8] *Etapas de funcionamiento de variadores de frecuencia*. [en línea], Automatismoindustrial, [Fecha de la consulta: 14 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://automatismoindustrial.com/d-automatizacion/1-7-arrancadores-electronicos-y-variadores-de-velocidad/funcionamiento-convertidor-de-frecuencia/>
- [9] *Formas constructivas de los motores eléctricos*. [en línea], Adajusa, [Fecha de la consulta: 17 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://adajusa.es/blog/2-como-determinar-la-brid-a-de-un-motor>
- [10] *Información y catálogo de los codificadores Pepperl-fuchs*, Pepperl-fuchs, [Fecha de la consulta: 18 de Abril de 2020]. Disponible en: [https://files.pepperl-fuchs.com/webcat/navi/productInfo/doct/t doct0654p\\_spa.pdf?v=11-NOV-19](https://files.pepperl-fuchs.com/webcat/navi/productInfo/doct/t doct0654p_spa.pdf?v=11-NOV-19)
- [11] *Propiedades del polimetil metacrilato*. [en línea], Universitat de Barcelona, [Fecha de la consulta: 20 de Abril de 2020]. Disponible en: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/polimetil-metacrilato>

- [12] *Propiedades del policarbonato*. [en línea], Universitat de Barcelona, [Fecha de la consulta: 20 de Abril de 2020]. Disponible en: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/policarbonato>
- [13] *SPECIFICATIONS NI USB-6001*. National Instruments, [Fecha de la consulta: 21 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.ni.com/pdf/manuals/374369a.pdf>
- [14] *Datasheet Raspberry Pi*. Raspberry Pi, [Fecha de la consulta: 21 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/datasheets.md>
- [15] *BeagleBone System Reference Manual*. Jason Kridner, [Fecha de la consulta: 21 de Abril de 2020]. Disponible en: [https://github.com/beagleboard/beaglebone-black/wiki/System-Reference-Manual#21\\_Document\\_Change\\_History](https://github.com/beagleboard/beaglebone-black/wiki/System-Reference-Manual#21_Document_Change_History)
- [16] *Información microcontrolador Arduino Uno*. [en línea], Arduino, [Fecha de la consulta: 21 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- [17] *Catálogo motores Cemer*. [en línea], Cosgra, [Fecha de la consulta: 24 de Abril de 2020]. Disponible en: [http://www.cosgra.com/productos/motores\\_electricos/cemer2.html](http://www.cosgra.com/productos/motores_electricos/cemer2.html)
- [18] *Variador ATV312H075M2*. [en línea], Schneider, [Fecha de la consulta: 24 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.se.com/es/es/product/ATV312H075M2/variador-de-velocidad-atv312---0%2C75-kw---1%2C8-kva---60-w---200-.240-v--monof%C3%A1sico/>
- [19] *Características codificador magnético Pololu*. [en línea], Pololu, [Fecha de la consulta: 15 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.pololu.com/product/3499>
- [20] *Datasheet LM358*. [en línea], ST, [Fecha de la consulta: 26 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/22762/STMICROELECTRONICS/LM358/3243/2/LM358.html>
- [21] *Datasheet ATmega328P*. [en línea], Microchip, [Fecha de la consulta: 3 de Mayo de 2020]. Disponible en: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf)
- [22] *Frecuencia de la señal PWM de Arduino*. [en línea], Control Automático Educación, [Fecha de la consulta: 29 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/arduino/pwm-arduino/>
- [23] *Principales comandos de Arduino*. [en línea], Arduino, [Fecha de la consulta: 2 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/reference/en>
- [24] *Guía de inicio rápido - ATV312*. [en línea], Schneider, [Fecha de la consulta: 15 de Febrero de 2020]. Disponible en: [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=User+guide&p\\_File\\_Name=ATV312\\_Getting\\_Started\\_SP\\_S1A10945\\_04.pdf&p\\_Doc\\_Ref=S1A10945](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=ATV312_Getting_Started_SP_S1A10945_04.pdf&p_Doc_Ref=S1A10945)

## 4.5. Referencias gráficas

- [25] *Partes de un motor eléctrico*. [en línea], Ticgalicia, [Fecha de la consulta: 10 de Abril de 2020]. Disponible en: <http://www.ticgalicia.com/2016/06/el-motor-de-jaula-de-ardilla-la-base-de.html>
- [26] *Funcionamiento motor trifásico*. [en línea], Motortico, [Fecha de la consulta: 10 de Abril de 2020]. Disponible en: <http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2015%20JUL%20-%20Principio%20del%20Campo%20Magnetico%20Rotatorio%20en%20Maquinas%20Trifasicas.pdf>
- [27] *Tipos de rotores en motores asíncronos*. [en línea], Universidad Tecnológica Nacional, [Fecha de la consulta: 11 de Abril de 2020]. Disponible en: [http://www1.frm.utn.edu.ar/mielectricas/docs/APUNTES\\_MAQUINAS\\_ELECTRICAS-\\_U\\_3\\_v1.1.pdf](http://www1.frm.utn.edu.ar/mielectricas/docs/APUNTES_MAQUINAS_ELECTRICAS-_U_3_v1.1.pdf)
- [28] *Etapas de funcionamiento de un variador de frecuencia*. [en línea], Automatismo industrial, [Fecha de la consulta: 11 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://automatismoindustrial.com/d-automatizacion/1-7-arrancadores-electronicos-y-variadores-de-velocidad/funcionamiento-convertidor-de-frecuencia/>
- [29] *Diagrama de bloques PID*. [en línea], Control automatico educacion, [Fecha de la consulta: 12 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-de-procesos/control-ipd/>
- [30] *Formas constructivas de los motor eléctrico*. [en línea], Adajusa, [Fecha de la consulta: 12 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://adajusa.es/blog/2-como-determinar-la-brid-a-de-un-motor>
- [31] *Motor eléctrico con freno*. [en línea], Motores electricos, [Fecha de la consulta: 12 de Abril de 2020]. Disponible en: [https://www.motoreselectricos.eu/motores-con-freno-a-1500-rpm\\_3455340.html](https://www.motoreselectricos.eu/motores-con-freno-a-1500-rpm_3455340.html)
- [32] *Motorreductor*. [en línea], Adajusa, [Fecha de la consulta: 12 de Abril de 2020]. Disponible en: [https://adajusa.es/motorreductor-trifasico-055kw-075cv-230400vac/motorreductor-trifasico-055kw-075cv-230400vac-rel-15-t40-186rpm.html?gclid=CjwKCAjwnIr1BRAWEiwA6GpwNYcTdsbw1vhgZpItEOQf1etKKb2P2atddb4\\_oDJMIbWgkhYr4jBTQRoCoEOQAvD\\_BwE](https://adajusa.es/motorreductor-trifasico-055kw-075cv-230400vac/motorreductor-trifasico-055kw-075cv-230400vac-rel-15-t40-186rpm.html?gclid=CjwKCAjwnIr1BRAWEiwA6GpwNYcTdsbw1vhgZpItEOQf1etKKb2P2atddb4_oDJMIbWgkhYr4jBTQRoCoEOQAvD_BwE)
- [33] *Señal de salida del encoder de cuadratura*. [en línea], Androminarobot, [Fecha de la consulta: 12 de Abril de 2020]. Disponible en: <http://androminarobot.blogspot.com/2016/08/encoder-de-cuadratura-y-arduino.html>
- [34] *Encoders ópticos*. [en línea], Universidad de León, [Fecha de la consulta: 14 de Abril de 2020]. Disponible en: <http://lra.unileon.es/es/pr%C3%A1cticassea/>

[controldevariadores/3configuraci%C3%B3ndelencoderdelvariador/descripci%C3%B3n](#)

- [35] *Encoders ópticos*. [en línea], Logicbus , [Fecha de la consulta: 14 de Abril de 2020]. Disponible en: [https://www.logicbus.com.mx/info\\_encoders.php](https://www.logicbus.com.mx/info_encoders.php)
- [36] *Sensor magnético*. [en línea], Universidad de Valladolid , [Fecha de la consulta: 14 de Abril de 2020]. Disponible en: <http://www.isa.cie.uva.es/~maria/sensores.pdf>
- [37] *Acoples rígidos*. [en línea], Epidor , [Fecha de la consulta: 13 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://epidor.com/blog/elegir-acoplamiento-rigido/>
- [38] *Acople cardan*. [en línea], Klugers , [Fecha de la consulta: 13 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.klugers.net/v3/mecanica/3-acoplamiento-ejes>
- [39] *Acoples flexibles*. [en línea], RS , [Fecha de la consulta: 14 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://es.rs-online.com/web/c/neumatica-hidraulica-y-transmision-de-potencia/transmision-de-potencia-acoplamientos/acoplamientos/?pn=2>
- [40] *Generador acoplado a motor*. [en línea], IES Cinco Villas , [Fecha de la consulta: 15 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://i.ytimg.com/vi/731ppW4eFaE/maxresdefault.jpg>
- [41] *Freno electromagnético*. [en línea], Goizper , [Fecha de la consulta: 15 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.goizper.com/es/industrial/frenos-y-embragues/electromagneticos>
- [42] *Módulo acondicionador frecuencia-voltaje*. [en línea], Connectric , [Fecha de la consulta: 17 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://connectric.com/Catalogue/FU252-SIGNAL-CONVERTER-FREQUENCY-to-ANALOGUE-AND-FREQUENCY-to-SERIAL>
- [43] *LM 331*. [en línea], Texas Instruments , [Fecha de la consulta: 17 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.ti.com/product/LM331>
- [44] *Microcontrolador Arduino*. [en línea], Arduino , [Fecha de la consulta: 17 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- [45] *Fuente de alimentación DC*. [en línea], Greenice , [Fecha de la consulta: 17 de Abril de 2020]. Disponible en: [https://greenice.com/es/transformadores-para-tiras-de-leds-12-24vdc/2398-transformador-led-12vdc-60w-5a-ip25-8435402526254.html?currency=EUR&gclid=CjwKCAjwv4\\_1BRAhEiwAtMDLsgoJGVe1282vSeB232\\_LYAUWrDKdT9IJ\\_swalG8yAg-epLd3n3atCxoCPf4QAvD\\_BwE](https://greenice.com/es/transformadores-para-tiras-de-leds-12-24vdc/2398-transformador-led-12vdc-60w-5a-ip25-8435402526254.html?currency=EUR&gclid=CjwKCAjwv4_1BRAhEiwAtMDLsgoJGVe1282vSeB232_LYAUWrDKdT9IJ_swalG8yAg-epLd3n3atCxoCPf4QAvD_BwE)
- [46] *Motor Cemer*. [en línea], Cosgra , [Fecha de la consulta: 24 de Abril de 2020]. Disponible en: [http://www.cosgra.com/productos/motores\\_electricos/cemer2.html](http://www.cosgra.com/productos/motores_electricos/cemer2.html)



- [47] *Conector 4 pines macho para sensores*. [en línea], BricoGeek , [Fecha de la consulta: 11 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://tienda.bricogeek.com/componentes/1091-conector-gx16-4-pines-macho.html>
- [48] *Señal PWM en Arduino*. [en línea], Luis Llamas , [Fecha de la consulta: 3 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/salidas-analogicas-pwm-en-arduino/>
- [49] *Módulo temporizador 12V DC*. [en línea], MicroJPM , [Fecha de la consulta: 2 de Mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.microjpm.com/products/ad40229/>
- [50] *Seta de emergencia*. [en línea], Heschen , [Fecha de la consulta: 2 de Mayo de 2020]. Disponible en: [https://www.amazon.es/Heschen-Interruptor-bot%C3%B3n-emergencia-color/dp/B07LFXB8PF/ref=sxsts\\_sxwds-bia-wc-pl3n1\\_0?cv\\_ct\\_cx=Heschen&dchild=1&keywords=Heschen&pd\\_rd\\_i=B07LFXB8PF&pd\\_rd\\_r=eff4ff61-4a02-476c-b00f-f703e0fd8adc&pd\\_rd\\_w=MCjWe&pd\\_rd\\_wg=6ub8k&pf\\_rd\\_p=4e29d9ed-c575-46a7-a0a9-c7071305573b&pf\\_rd\\_r=V0JWQGJWN106876WGCQT&psc=1&qid=1588929225&sr=1-1-91e9aa57-911e-4628-99b3-09163b7d9294](https://www.amazon.es/Heschen-Interruptor-bot%C3%B3n-emergencia-color/dp/B07LFXB8PF/ref=sxsts_sxwds-bia-wc-pl3n1_0?cv_ct_cx=Heschen&dchild=1&keywords=Heschen&pd_rd_i=B07LFXB8PF&pd_rd_r=eff4ff61-4a02-476c-b00f-f703e0fd8adc&pd_rd_w=MCjWe&pd_rd_wg=6ub8k&pf_rd_p=4e29d9ed-c575-46a7-a0a9-c7071305573b&pf_rd_r=V0JWQGJWN106876WGCQT&psc=1&qid=1588929225&sr=1-1-91e9aa57-911e-4628-99b3-09163b7d9294)
- [51] *Final de carrera*. [en línea], Cetronic , [Fecha de la consulta: 5 de Mayo de 2020]. Disponible en: [https://www.cetronic.es/sqlcommerce/disenos/plantilla1/seccion/producto/DetalleProducto.jsp?idIdioma=&idTienda=93&codProducto=999180070&cPath=1160&gclid=EAIaIQobChMIy0L94fej6QIVBYXVCh3Q5w8nEAYYASABEGKChPD\\_BwE](https://www.cetronic.es/sqlcommerce/disenos/plantilla1/seccion/producto/DetalleProducto.jsp?idIdioma=&idTienda=93&codProducto=999180070&cPath=1160&gclid=EAIaIQobChMIy0L94fej6QIVBYXVCh3Q5w8nEAYYASABEGKChPD_BwE)
- [52] *Interruptor magnetotérmico 10A*. [en línea], Legrand , [Fecha de la consulta: 8 de Mayo de 2020]. Disponible en: [https://gruporp.es/comprar/interruptor-magnetotermico-unipolar-legrand-402414-10a-230v.html?id\\_product\\_attribute=0](https://gruporp.es/comprar/interruptor-magnetotermico-unipolar-legrand-402414-10a-230v.html?id_product_attribute=0)
- [53] *Conector banana hembra 4 mm*. [en línea], Farnell , [Fecha de la consulta: 10 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://es.farnell.com/staubli/23-3060-21/toma-4mm-32a-envuelto-ng-r-paquete/dp/1085460>
- [54] *Conector banana macho 4 mm*. [en línea], Farnell , [Fecha de la consulta: 10 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://es.farnell.com/multicomp/25-413-1/macho-banana-24a-4-mm-gu-a-rojo/dp/1698963>
- [55] *Prensaestopas*. [en línea], RS-Online , [Fecha de la consulta: 10 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://es.rs-online.com/web/p/casquillos-prensaestopas/4442789/>
- [56] *Bisagras con fijación de ángulo*. [en línea], Cymisa , [Fecha de la consulta: 17 de Mayo de 2020]. Disponible en: <http://www.cymisa.com.mx/nuevobisagras.html>

## 5 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

- A: Amperios.
- AC: Altern Current (Corriente Alterna).
- cm: Centímetros.
- CPR: Cuentas Por Revolución.
- CV: Caballo de Vapor
- D: Diámetro.
- DAQ: Data Adquisition (Adquisición de datos).
- dB: Decibelios.
- DC: Direct Current (Corriente Continua).
- F: Faradios.
- f: Frecuencia.
- HP: Horse Power (Caballos de vapor).
- Hz: Hercios.
- Kp: Ganancia proporcional.
- kW: Kilovatios.
- $k\Omega$  : Kiloohmios.
- mm: Milímetros.
- ms: Milisegundos.
- NA: Normalmente Abierto.
- NC: Normalmente Cerrado.
- PMMA: Polimetilmetacrilato (metacrilato).
- Regulador P: Regulador Proporcional.
- Regulador PI: Regulador Proporcional e Integral.
- Regulador PD: Regulador Proporcional y Derivativo.
- Regulador PID: Regulador Proporcional, Integral y Derivativo.

- R.P.M: Revolutions Per Minute (Revoluciones por minuto).
- P.W.M: Pulse Width Modulation (Modulación por Ancho de Pulso).
- s: Segundos.
- Td: Constante de derivación.
- Ti: Constante de integración.
- V: Voltios.
- W: Vatios.
- $\mu$ F: MicroFaradios.
- $\Omega$  : Ohmios.
- €: Euros.
- 3D: Tres dimensiones.

## 6 REQUISITOS DE DISEÑO

El presente proyecto tendrá que cumplir con ciertos requisitos de diseño. Estos se pueden clasificar en:

- Requisitos de diseño del banco de pruebas.
- Requisitos de funcionalidad del sistema.
- Requisitos de hardware.
- Requisitos de software.
- Requisitos de alimentación.

### 6.1. Requisitos de diseño del banco de pruebas

Dentro de los requisitos de diseño, el proyecto deberá cumplir los siguientes puntos:

- Se deberá realizar un diseño simple, minimizando las partes mecánicas del mismo.
- El diseño deberá de ser, dentro de las posibilidades del mismo, lo más económico posible.
- Diseño modular y flexible, en el que se puedan realizar modificaciones sin necesidad de llevar a cabo grandes cambios.
- Será necesario incorporar al diseño, medidas de seguridad que protengan al usuario de los elementos móviles del sistema. De igual forma, el diseño deberá garantizar una manipulación segura.
- El diseño tendrá que facilitar el acople de diferentes cargas al motor. Estas cargas podrán ser sustituidas y reemplazadas de forma segura, sin poner en riesgo al usuario.

### 6.2. Requisitos de funcionalidad del sistema

En cuanto a la funcionalidad del proyecto encontramos los siguientes requisitos:

- El motor utilizado deberá de ser un motor trifásico asíncrono, con una potencia de 1 CV. Además, este motor tendrá que tener una velocidad máxima de 1500 r.p.m.
- El variador de frecuencia se adecuará a los requerimientos de potencia y alimentación del motor.
- El sistema se podrá detener en cualquier momento, tanto por software, como por hardware.

- El sensor de velocidad empleado, deberá presentar una medición estable de la velocidad.
- En caso de que fuese necesario, la señal del sensor de velocidad empleado, deberá de ser adaptada a niveles de tensión de 0 a 10 V, empleando para ello un Arduino o similar.
- El sistema de cargas, tendrá que asegurar que el equipo presenta las especificaciones del transitorio típicas de un sistema subamortiguado (sistema inercial).

### **6.3. Requisitos de hardware**

- Dentro de las posibilidades, la selección de actuadores y sensores, seguirá un criterio económico, intentando reducir el coste del sistema.
- Se utilizará un Arduino, o similar, para la tarjeta de adquisición de datos. Siempre que se requiera, la DAQ deberá incluir todos los circuitos o elementos hardware necesarios para que el sistema sea capaz de funcionar con señales de entrada y salida con valores de tensión de 0 a 10 V.
- Con el objetivo de flexibilizar el proyecto, la tarjeta de adquisición de datos tendrá que diferenciarse claramente del resto de componentes del banco de pruebas, de tal forma que se pueda quitar del sistema sin tener que realizar modificaciones.
- La parte electrónica del proyecto, será modular y flexible, de tal forma que, en caso de una avería en cualquier dispositivo, se pueda reemplazar rápidamente sin necesidad de tener que emplear herramientas muy técnicas.

### **6.4. Requisitos de software**

- Se diseñará un código de control tipo PID en Matlab, o similar. Este código, será lo más claro posible, facilitando la comprensión del mismo a cualquier usuario.

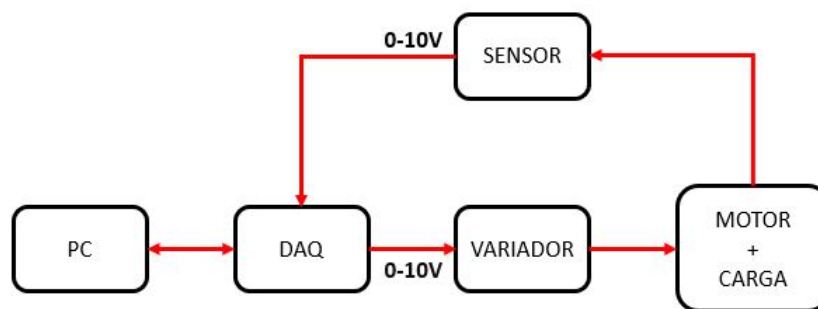
### **6.5. Requisitos de alimentación del proyecto**

- Para la alimentación de todo el banco de pruebas, se empleará un único cable de alimentación, que deberá de suministrar energía a todo el proyecto.

## 7 ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES

Para poder llevar a cabo un análisis de las diferentes soluciones que se pueden implementar en el diseño del banco de pruebas, servirá de gran ayuda mencionar brevemente, y de forma general, los distintos dispositivos que se deben incluir en el proyecto.

- Motor trifásico.
- Variador.
- Sensor de velocidad.
- Tarjeta de adquisición de datos.
- Cargas mecánicas para el motor.



**Figura 7.1** – Dispositivos hardware que intervienen en el banco de pruebas

Siguiendo el esquema de la Figura 7.1, en este capítulo se tratarán las diferentes alternativas y soluciones propuestas para la realización del banco de pruebas, ordenados de tal forma en la que se pueda apreciar la evolución de cada una de las fases del proyecto que dan sentido al diseño final del equipo.

En concreto, se analizarán las diferentes alternativas presentes sobre los siguientes puntos del proyecto:

- Diseño mecánico del sistema.
- Estudio de las alternativas presentes en el mercado, para la selección del motor empleado.
- Estudio de los diferentes variadores de frecuencia comerciales.
- Selección de sensores empleados para medir la velocidad de rotación del motor.
- Análisis de los diferentes tipos de cargas para acoplar al motor.
- Análisis y diseño de los sistemas y elementos de protección.

- Diseño de circuitos electrónicos de adaptación de señales y Tarjeta de Adquisición de Datos.
- Selección de los equipos de alimentación del proyecto.
- Disposición espacial de los elementos que conforman el sistema.
- Programación software para el funcionamiento y control del equipo.

## 7.1. Diseño mecánico del sistema

En la primera fase del proyecto se analizarán las diferentes opciones de diseño que se pueden implementar para la funcionalidad requerida, buscando alternativas compactas y simples.

Para el presente proyecto, el diseño se centrará básicamente en la disposición de los diferentes elementos que actúan mecánicamente en el proceso.

Estos equipos son:

- Motor trifásico.
- Cargas mecánicas.
- Sensor de lectura de velocidad.

La disposición espacial de estos tres elementos será un factor determinante a la hora de seleccionarlos.

Como punto de partida en cuanto al diseño general de este, es que, el sistema se diseñará para funcionar horizontalmente, apoyado sobre una superficie plana (tablero, mesa...) simplificando así las opciones de diseño. Teniendo en cuenta esta información se pueden diferenciar las siguientes opciones:

1. **Motor + carga + sensor:** con esta disposición la carga se acopla al eje delantero del motor y el sensor se tendría que acoplar a la carga.

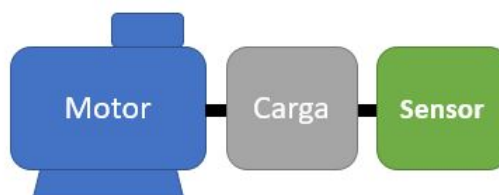
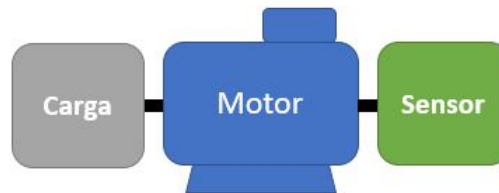


Figura 7.2 – Motor+carga+sensor

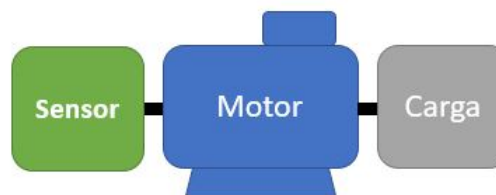
2. **Carga + motor + sensor:** este diseño se basa en acoplar el sensor en la parte frontal del motor y la carga en el eje posterior.

Es importante destacar que, tanto para esta disposición como para la que se presente a continuación, se ha tenido en cuenta, como bien se explicará en el siguiente apartado 7.2, la posibilidad de obtener un motor con acceso al eje por la parte trasera del mismo.



**Figura 7.3** – Carga + motor + sensor

3. **Sensor + carga + motor:** el último diseño, al igual que el anterior, se basa en el empleo de un motor con accesibilidad trasera al eje de rotación para poder conectar el sensor. La carga se acoplará al eje delantero.



**Figura 7.4** – Sensor + carga + motor

Analizando las tres propuestas expuestas, las que mayor robustez presentan son la segunda y la tercera, ya que, tanto el sensor como la carga, se pueden acoplar directamente al eje del motor. Además, con estos diseños, se tiene un acceso directo a la carga.

Puesto que el propio diseño del motor está pensado para acoplar la carga en el eje delantero, la opción seleccionada será la tercera, sensor + motor + carga.

## 7.2. Estudio de las alternativas presentes en el mercado, para la selección del motor empleado

Como ya se presentó en el punto 1 del apartado 6.2, para facilitar la selección del motor eléctrico, se establecen los siguientes datos de partida:

Datos de partida	
Tipo de Motor	Asíncrono
Tipo de Alimentación	Trifásica
Potencia (CV)	1 CV
Velocidad	1500 r.p.m.

**Tabla 7.1** – Datos de partida del motor del equipo

Los datos reflejados en la Tabla 7.1, sirven de gran ayuda para acotar la amplia variedad de motores que se pueden encontrar en el mercado.



En una primera selección, podemos diferenciar dos tipos de motores, en función de la tecnología que emplean en el rotor. Como ya se expuso en el apartado 3.2.1, podemos diferenciar, motores con rotor en jaula de ardilla y motores con rotor devanado. Algunas de sus características son:

■ **Motor con rotor en jaula de ardilla.**

- Diseño y construcción simple y compacta.
- Apenas necesitan mantenimiento.
- Amplio campo de aplicación, con rangos de potencia amplios.
- Precio reducido respecto al resto de motores.
- Gran variedad de marcas que ofertan estos motores.

■ **Motor con rotor devanado.**

- Necesitan un mayor mantenimiento que los motores de jaula de ardilla.
- Precio elevado.
- Campo de aplicación reducido, empleados frecuentemente en aplicaciones que necesitan un par de arranque elevado.

También podemos diferenciar a los motores comerciales en función de la forma constructiva, o tipo de fijación (bridas), que presentan. Estos parámetros determinarán el tipo de montaje del motor.

Algunas de las formas constructivas más frecuentes son:

- **Brida tipo B3 (IMB3) [9]:** el motor se fija mediante patas, las cuales, tienen una serie de taladros pasantes para que el motor pueda ser fijado, empleando tornillos, a la bancada (Figura 7.5(a)).
- **Brida tipo B5 (IMB5) [9]:** en esta forma constructiva, el motor se fija por la parte delantera, empleando para ello, tornillos pasantes al motor y roscados sobre la bancada o el dispositivo de fijación (Figura 7.5(b)).
- **Brida tipo B14 (IMB14) [9]:** al igual que en el caso anterior, en este modelo constructivo, el motor se fija por la parte delantera, pero, en cambio, los tornillos de fijación son pasantes en la bancada y roscados en el motor (Figura 7.5(c)).



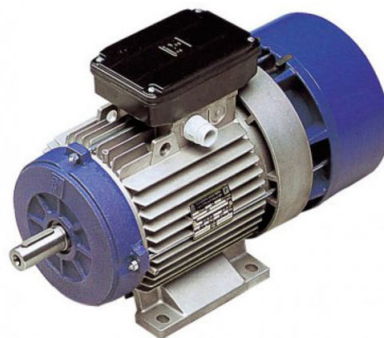
**Figura 7.5** – Formas constructivas de los motores [30]

Otro factor a tener en cuenta para la selección del motor es conocer si, además del propio eje frontal de transmisión, también es posible acceder al eje por la parte trasera. De esta forma, se podrá tener mayor grado de integración con el resto de dispositivos del equipo.

Este último factor no será muy determinante en la selección del mismo, ya que, la mayoría de los motores, añaden un eje extendido en su parte trasera, en donde suelen acoplar unas aspas (estilo ventilador) para facilitar la refrigeración del mismo. Estas aspas, se sitúan dentro de un protector, normalmente metálico, fijado al motor por tornillos.

Por otra parte, en la actualidad, se pueden encontrar una gran variedad de motores equipados con diferentes dispositivos auxiliares, que realizan tareas complementarias a la propia funcionalidad del motor. Atendiendo a estos equipos podemos diferenciar:

- **Motores eléctricos equipados con frenos electromagnéticos:** estos motores se caracterizan por incorporar un freno electromagnético acoplado directamente al eje del motor por la parte trasera.



**Figura 7.6** – Motor trifásico con freno electromagnético [31]

- **Motores eléctricos equipados con encoders:** estos motores incorporan un encoder, normalmente de eje pasante, en la parte trasera del motor.
- **Motores eléctricos con reductora:** incorporan cajas reductoras de engranajes conectadas en la parte delantera del eje.



**Figura 7.7** – Motor trifásico con reductora [32]

Es importante destacar que los motores que incorporan alguno de estos dispositivos, suelen tener un precio muy elevado respecto a los motores trifásicos convencionales.

Ya que el presente proyecto debía de tener un coste lo más ajustado posible, se adquirió un motor trifásico convencional, de los requerimientos de potencia y velocidad indicados en los requisitos de diseño 6.2. Además, este motor presenta un montaje por patas (brida B3) y acceso al eje por la parte trasera del mismo, con el que poder implementar la disposición espacial seleccionada en el apartado anterior 7.1.

El modelo y las características del motor seleccionado se explicarán en el apartado 8.2.

### 7.3. Estudio de los diferentes variadores de frecuencia comerciales

En esta sección se comentará brevemente los diferentes modelos de variadores de frecuencia que se pueden encontrar en el mercado.

Este variador se adaptará, tanto a las características eléctricas del motor, como a las propias del sistema, comentadas en el apartado 6.2, por lo que los datos de partida del variador de frecuencia son:






Datos de partida del variador	
Tensión de red	220 V
Frecuencia de red	50 Hz
Nº de fases de red	Monofásica
Potencia del motor (HP)	1 HP
Potencia del motor (kW)	0.75 kW
Nº fases motor	Trifásica
Entrada analógica de tensión para control de velocidad	Sí

**Tabla 7.2** – Datos de partida del variador de frecuencia

Los datos reflejados en la Tabla 7.2 simplifican el proceso de selección del variador de tal

forma que, los únicos parámetros seleccionables sean la marca y el precio del dispositivo.

Algunos de los variadores comerciales que cumplen con las características enunciadas en la Tabla 7.2 son:

Marca	Modelo	Imagen
Delta	VFD007EL21E	
Siemens	SINAMICS V20 - 6SL3210-5BB17-5BV1	
Schneider	ATV12HU075M2	
ABB	ACS150-01E-04A7-2	
LS	9LSLV0008M100	

**Tabla 7.3** – Modelos de variadores de frecuencia

Para el presente proyecto se empleará el modelo ATV12HU075M2 de la casa de Schneider, ya que la universidad disponía de algunas unidades, y además, este modelo es empleado por las plantas de nivel (Apartado 3.1.2) del Laboratorio de Optimización y Control presentando una muy buena funcionalidad.

No obstante, a consecuencia de la estandarización de este tipo de dispositivos, cualquier modelo de variador de frecuencia indicado en la Tabla 7.3 se podría emplear en el presente proyecto sin necesidad de tener que realizar modificaciones en el mismo.

## 7.4. Selección de sensores empleados para medir de la velocidad de rotación del motor [10]

### 7.4.1. Tipos de sensores de velocidad

Hoy en día, podemos encontrar una amplia variedad de dispositivos capaces de medir la velocidad de rotación de un eje, empleando para ello diferentes tecnologías y diseños.

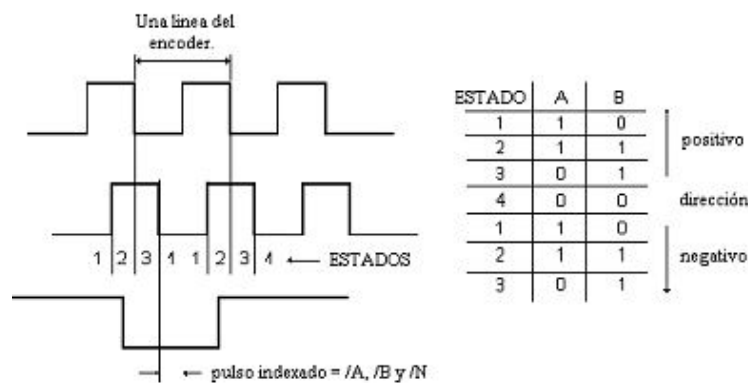
El sensor empleado en el presente proyecto tendrá que funcionar con los requerimientos de precisión y velocidad indicados en el apartado 6.2.

Los sensores más frecuentes para realizar estas mediciones son los encoders rotativos, que traducen la posición angular del eje en señales eléctricas. Dentro de los encoders podemos diferenciar encoders incrementales y encoders absolutos.

#### ■ Encoders incrementales.

Este tipo de dispositivos ofrecen una salida tipo tren de pulsos eléctricos. Cada pulso corresponde a un determinado ángulo de giro. Este ángulo viene determinado por la resolución del sensor, por lo que, contando el número de pulsos que se suceden desde una posición inicial (posición de referencia), se puede conocer el desplazamiento efectuado. Si además se mide el tiempo que transcurre entre la posición de referencia y la posición del motor, se puede obtener el valor de la velocidad.

Frecuentemente, los codificadores incrementales, disponen de dos señales de salida, una desfase respecto de la otra, con la que conocer el sentido de giro del eje. A este tipo de dispositivos se les conoce como encoders incrementales de cuadratura o simplemente encoder de cuadratura.



**Figura 7.8** – Señal de salida de un encoder de cuadratura [33]

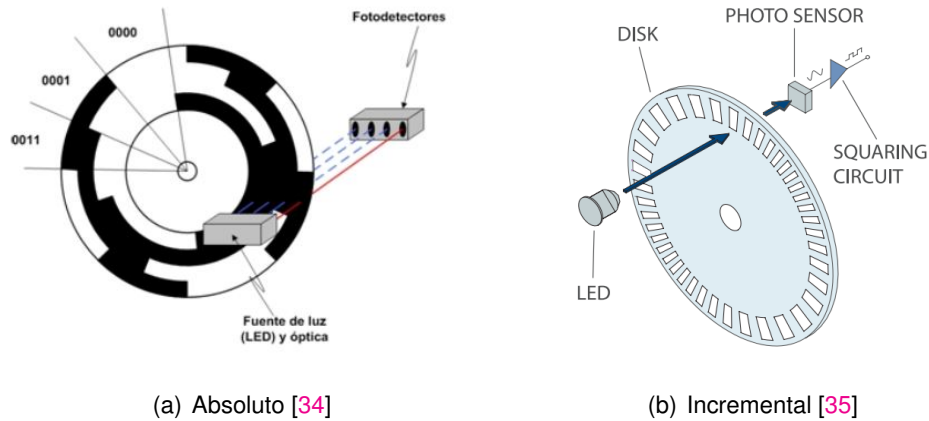
#### ■ Encoders absolutos.

Estos sensores indican la posición absoluta del eje, emitiendo, como señal de salida, un código binario que determina una posición única. Al igual que en los encoders incrementales, con este tipo de sensores se puede obtener el valor de velocidad conociendo la variación del ángulo y del tiempo.

Tanto los encoders incrementales como los absolutos se pueden diferenciar también por la tecnología que emplean, diferenciando de este modo sensores ópticos y sensores magnéticos.

- Los codificadores ópticos emplean un foto emisor, un foto receptor, que se sitúan enfrentados, y un disco conectado al eje del sistema a medir. Este disco se encuentra “codificado” con unas zonas transparentes y otras opacas, de tal forma que, al girar el eje, mientras el emisor infrarrojo emite luz, el foto-receptor recibe pulsos de luz en función del código grabado en el disco, generando, de esta forma, la señal eléctrica de salida.

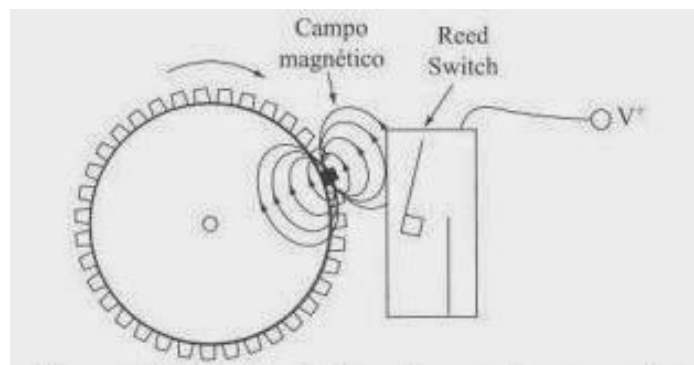
Los discos de los encoders absolutos emplean la codificación Gray (Figura 7.9(a)), mientras que, en los incrementales, los discos utilizan una codificación de ranuras sucesivas (Figura 7.9(b)).



**Figura 7.9 – Funcionamiento encoders ópticos**

- Por otra parte, los encoders magnéticos, basan su funcionamiento en la detección del campo magnético.

Los sensores incrementales que emplean esta tecnología utilizan discos con imanes y sensores de efecto Hall (o interruptores Reed). De esta forma, al girar el disco se activa o desactiva el sensor Hall/Reed generando la señal de salida.



**Figura 7.10 – Funcionamiento encoder magnético incremental [36]**

En cambio, los sensores absolutos emplean dispositivos capaces de detectar la variación del campo magnético que produce el giro de un imán acoplado al eje de rotación del sistema.

#### 7.4.2. Tipos de montaje de los encoders

Dentro de la selección del sensor cobrará una gran importancia el tipo de montaje que presentan, ya que afectará al diseño general del equipo. En cuanto al montaje que presentan podemos diferenciar:

Tipos de montaje	
	Eje saliente
	Eje pasante
	Sin contacto

**Tabla 7.4** – Tipos de montaje de los encoders

Además de los encoders, para medir la velocidad, también se pueden emplear tacogeneradores. Los tacogeneradores son dispositivos que convierten la velocidad rotacional de un eje en un valor proporcional de tensión (tanto AC como DC). Su funcionamiento se asemeja al de un generador eléctrico. La principal ventaja de estos equipos es que su señal de salida es analógica por lo que puede integrarse directamente en sistemas realimentados. Este tipo de sensores presentan un montaje tipo eje saliente ya que necesitan acoplarse mecánicamente al eje del sistema a medir.

Para el presente proyecto, inicialmente se seleccionó como sensor, un encoder absoluto de carácter industrial modelo TBN 50-SA 2048R C2 S N14 del fabricante TWK-Electronik, ya que la universidad disponía de alguno de ellos y, pese a ser de carácter industrial, se podían adquirir de segunda mano por un precio bastante asequible.

Por otra parte, este encoder presentaba un tipo de montaje de eje saliente, por lo que, podría servir de ejemplo para cualquier tipo de encoder que empleara esa construcción, pudiendo comprobar el grado de adaptación que presentaba este tipo de montaje en el sistema.

Además, este encoder utiliza como protocolo de comunicación, BUS-CAN, con lo que, empleándolo en el sistema, se podría obtener un equipo análogo a los que se encuentran en el ámbito industrial, con una tecnología integrada similar.



**Figura 7.11** – Encoder absoluto modelo TBN 50-SA 2048R C2 S N14

El empleo de un encoder de eje saliente, al necesitar de una unión mecánica de su eje con el del sistema a medir, supone analizar los diferentes acoples o elementos que faciliten la integración de ambos.



### 7.4.3. Clasificación de los acoples

Para acoplar ejes se pueden emplear alternativas tales como:

- **Acoplamientos rígidos [3]**

Estos acoplamientos están diseñados para unir dos ejes de forma apretada sin posibilidad de generar movimiento relativo entre ellos. La principal desventaja que presentan estos acoples es que, para evitar las fatigas de los ejes y su posterior ruptura, necesitan una alineación muy precisa entre ellos, siendo necesario para ello herramientas específicas y conocimientos mecánicos muy avanzados.

Debido a que para este proyecto no se dispone de la tecnología adecuada para alinear de forma precisa ejes, esta opción queda totalmente descartada.



(a) Acople de manguito



(b) Acople de platillos

**Figura 7.12 – Acoplamientos rígidos [37]**

- **Acoplamientos especiales o articulados [3]**

Este tipo de acoples se emplean para unir dos ejes desalineados y que precisan de una alta transmisión de potencia. Dentro de este tipo de acoplamientos se encuentran los acoples de junta universal, más conocidos como acoplamientos cardan (Figura 7.13), y los acoples de junta eslabonada.



**Figura 7.13 – Acople cardan [38]**

- **Acoplamientos flexibles [3]**



Los acoplamientos flexibles están diseñados para transmitir par entre ejes con pequeñas desalineaciones (angular, axial o radial), por lo que no necesitan de un alineado muy preciso para funcionar correctamente (Figura 7.14).



Como se puede observar en la información anteriormente expuesta, los acoples que corrigen desviaciones de ejes son los flexibles o los articulados.

A consecuencia de que el eje del encoder no requiere elevado par, los acoples articulados se descartan para el diseño del proyecto, por lo que el estudio de las diferentes variantes se centrará en los acoples flexibles.

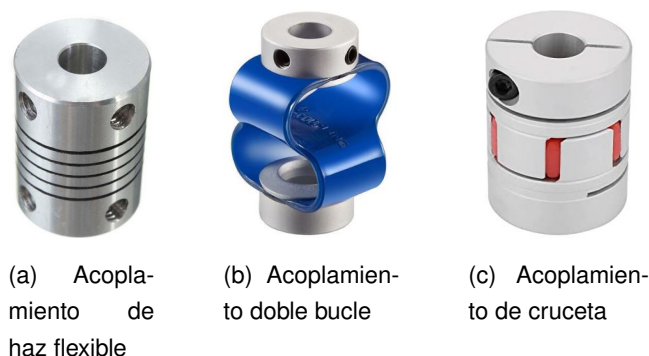
A la hora de seleccionar el acople es necesario conocer las dimensiones y características de los ejes a unir y los requerimientos de par de transmisión:

Datos de partida para la selección del acople	
Diámetro eje motor:	20 mm
Tipo de eje:	
Diámetro eje encoder:	12 mm
Tipo de eje:	
Par de unión:	Bajo

**Tabla 7.5** – Datos de partida para la selección del acople

A partir de los datos de la Tabla 7.5 se pueden considerar el empleo de tres tipos de acoplamientos flexibles, que se utilizan normalmente en aplicaciones de muy baja transmisión de par:

- Acoplamiento de haz flexible (Figura 7.14(a)).
- Acoplamiento de tipo K con elastómero de bucle doble (Figura 7.14(b)).
- Acoplamiento de cruceta con elastómero (Figura 7.14(c)).



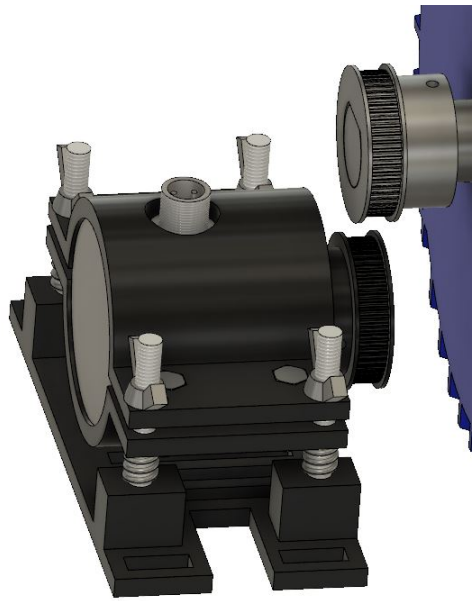
**Figura 7.14** – Acoplamientos flexibles [39]

Una vez seleccionados los tipos de acoples que se podían emplear en el diseño se buscó uno que se pudiera acoplar directamente a ambos ejes (20 y 12 mm de diámetro).

La gran diferencia de diámetros entre los dos ejes, 8 mm, complicó la búsqueda, de tal forma que no se encontrara ningún acople económico que pudiera trabajar con esas medidas.

#### 7.4.4. Diseño de sistemas alternativos para el acople de ejes

A consecuencia de no poder conseguir ningún acople mecánico de ejes, se consideró diseñar un sistema alternativo de unión. De esta manera, surgió como alternativa emplear un sistema de poleas, compuesto por unas ruedas dentadas y una correa de distribución, de tal forma que una rueda dentada se acople al eje del motor y la otra al del encoder. Con este diseño se elimina la necesidad de tener que alinear el eje, pero, por contra, se necesita diseñar las ruedas y el sistema de tensión de la correa.



**Figura 7.15** – Diseño acoplamiento por correas

Como se puede observar en la Figura 7.15, en el sistema diseñado se puede diferenciar el dispositivo de tensión de la correa y las ruedas dentadas tanto del motor como del encoder.

- La ruedas dentadas se diseñaron con el mismo diámetro exterior, para mantener la relación de velocidades unitaria, y con el diámetro y forma interna adecuada al eje al que se acopla cada una.

Otro factor que se tuvo que tener en cuenta en este diseño fue el tipo de dentado que presentaban las ruedas. Analizando los diferentes tipos de correas que había en el mercado se decidió emplear una correa GT2, ya que se pudo conseguir una correa con la longitud requerida.

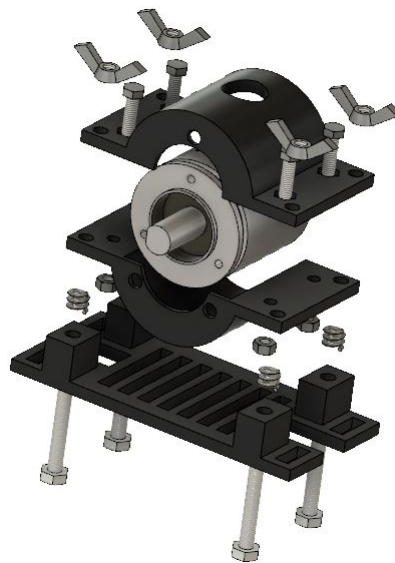


**Figura 7.16** – Diseño de la rueda dentada

- Por otra parte, se puede diferenciar el sistema tensor, que a su vez actúa de soporte del sensor.

Este sistema está compuesto por una base, en la que se sitúan 4 tornillos que, junto con las palometas y los muelles, sirven de elementos de regulación de la altura del encoder, actuando de esta forma sobre la tensión de la correa.

Para poder integrar el encoder con el sistema tensor, se diseña una especie de funda, en dos partes unidas por tornillos, para poder situar el sensor en la posición requerida.



**Figura 7.17** – Partes soporte y del sistema de tensión

La principales ventajas que presenta este diseño son:

- Los ejes no tiene que estar alineados.
- Alto grado de integración de los diferentes encoders, ya que este diseño se adapta a todos los dispositivos que presentan eje saliente.
- Facilidad de construcción ya que las piezas pueden ser impresas en 3D.

Una vez diseñado el sistema, se procedió a imprimir en 3D las piezas necesarias, y montarlo para poder probar su funcionalidad.

Con la realización de las pruebas se pudo comprobar como este sistema generaba muchas vibraciones en el propio encoder, ya que la precisión de la impresión en 3D no era lo suficientemente precisa para realizar esa función. Estas vibraciones provocaban alteraciones en las mediciones efectuadas por el codificador. Además, después de un corto periodo de tiempo funcionando, el sistema se destensaba.

Por la razones expuestas anteriormente, se descartó, tanto la utilización de este diseño, como el empleo de los codificadores de eje saliente.

Bien es cierto que este diseño podría llegar a funcionar si las piezas fueran mecanizadas, pero esto no se planteó, pues suponía un encarecimiento del equipo, así como, una complejidad mecánica innecesaria.

En este punto se consideró el empleo de sensores magnéticos ya que simplificarían el diseño, puesto que, este tipo de codificadores, no necesitan acoplarse mecánicamente al eje de rotación. Además, debido a su pequeño tamaño, se podría emplear la propia carcasa del ventilador del motor como soporte de los mismos.

#### 7.4.5. Selección del encoder magnético

Los encoders magnéticos que se barajaron fueron los reflejados en la siguiente tabla:

Encoders magnéticos	
Encoder absoluto AS5600 (12 bits)	
Encoder de cuadratura 12 CPR	
Encoder de cuadratura 11 CPR	
Encoder de cuadratura 20 CPR	

**Tabla 7.6** – Encoders magnéticos

Es importante destacar, dentro de los codificadores de cuadratura, que un mayor número de cuentas por revolución (C.P.R.) aumenta la precisión del mismo, reduciendo el error en la medida.

En un primer momento se seleccionó el encoder absoluto AS5600 ya que su resolución, 12 bits, era adecuada para el sistema, y muy superior a la de los encoders de cuadratura. No obstante, a consecuencia de la falta de stock de este dispositivo, se tuvo que descartar su uso en el proyecto.

Finalmente se seleccionó el encoder de cuadratura de 20 C.P.R., ya que, comparado con el resto de codificadores incrementales, es el que mayor resolución (número de cuentas por revolución) presenta. Pese a que la resolución de este codificador es mucho menor que la del AS5600, es apta para los requisitos del sistema.

Como consecuencia de emplear un encoder de cuadratura, será necesario adaptar la señal a los requerimientos del proyecto, es decir, convertir la señal de salida del codificador (tren de pulsos) a una señal analógica de tensión (0-10V).

Para realizar esta conversión se diseñará un circuito de adaptación compuesto por un microcontrolador Arduino, que generará una señal PWM (0-5V) proporcional a la señal medida por el codificador, y un circuito electrónico de filtrado y amplificación que convertirá la señal de salida del Arduino a una señal analógica de tensión (0-10V).

Este circuito de adaptación se explicará en el apartado 8.5.

Por otra parte, el encoder seleccionado y su colocación en el sistema se recogen en el apartado 8.4 del presente proyecto.

## 7.5. Análisis de los diferentes tipos de cargas para acoplar al motor

En este apartado se analizarán las diversas alternativas a la hora de seleccionar las cargas aplicadas al motor. Será muy importante tener en cuenta la posibilidad de cambiar dichas cargas. Algunas de las principales opciones son:

- Empleo de un generador acoplado al motor. Este generador llevaría acoplado un conjunto de cargas eléctricas que se puedan conectar o desconectar, produciendo de esta manera variaciones en la misma.

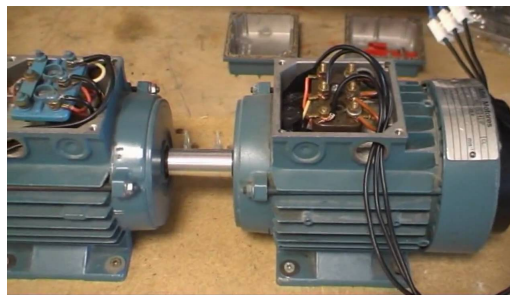


Figura 7.18 – Motor acoplado a generador [40]

Esta alternativa presenta la desventaja de emplear un generador, y cargas eléctricas, como resistencias de potencia, encareciendo el coste del diseño.

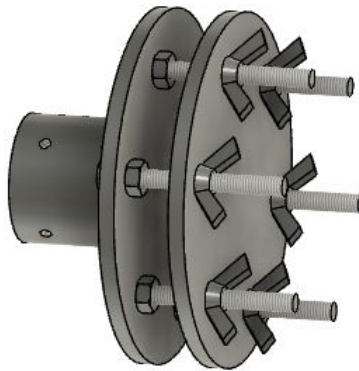
- Otra alternativa, es el empleo de un freno electromagnético conectado al eje del motor. Este freno genera diferentes cargas en función de la tensión que recibe.



**Figura 7.19** – Freno electromagnético [41]

Como se comentó en el apartado 7.2, hay motores que ya disponen de este dispositivo integrado, siendo la desventaja principal de esta opción, su alto coste.

- La última alternativa planteada es el diseño de un acople metálico de discos, acondicionado al eje de salida del motor seleccionado. Este acople, servirá de soporte para las diferentes cargas (discos de diferentes grosores de chapa).



**Figura 7.20** – Acople con disco de carga

Una de las principales ventajas de esta opción es la de simplificar el diseño. Por el contrario, esta opción supone la necesidad de mecanizar tanto el acople como los discos.

Es importante destacar que, en un primer momento, las tres alternativas comentadas anteriormente, se barajaron como opciones del sistema, pero analizando las respuestas que se obtenían con cada una de ellas, se pudo descartar las dos primeras, ya que, empleando cualquiera de ellas, no se consigue un sistema inercial con el que obtener sobreoscilaciones (punto recogido en las especificaciones del sistema 6.2). Por este motivo, el análisis de las cargas se simplificó a diseñar en 3D, los discos y el acople, conforme a las características y dimensiones del eje de salida del motor.

El diseño final, tanto del acople como el de las cargas, se recoge en el apartado 8.6 del presente trabajo.

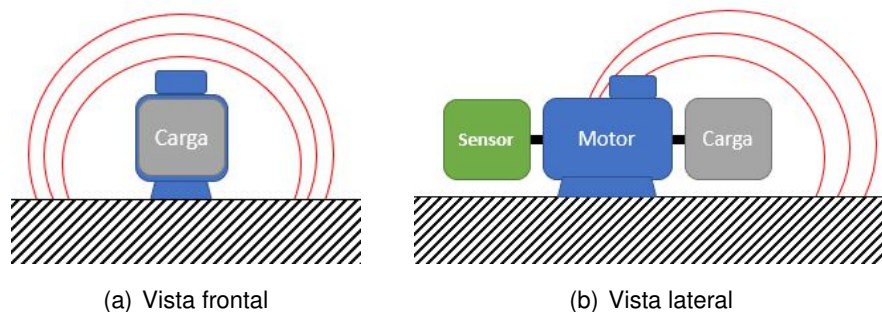
## 7.6. Análisis y diseño de los sistemas y elementos de protección

Una vez diseñado el equipo, compuesto por motor, carga y sensor, es necesario diseñar el sistema de protección que tendrá que proteger al usuario de los peligros del sistema, de tal forma que, el funcionamiento del banco de pruebas sea lo más seguro posible.

Como primer paso para un correcto desarrollo de los elementos de protección, se deberán estudiar los posibles riesgos mecánicos de la planta.

Debido a la simplicidad del diseño seleccionado (Apartado 7.1), los riesgos que presenta el sistema se centran en la posibilidad de que el usuario pueda contactar con las piezas móviles, cuando estas están en movimiento, y en la proyección de las mencionadas piezas (carga y acople). De esta manera será imprescindible diseñar un dispositivo capaz de detener esas posibles proyecciones, así como, evitar que el usuario tenga contacto con los dispositivos móviles, cuando el sistema esté en funcionamiento.

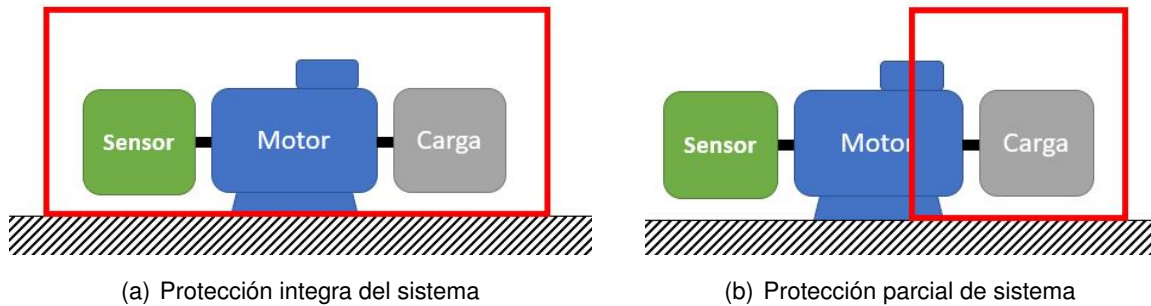
Normalmente, para proteger a las personas de proyecciones de elementos, y también para evitar el contacto usuario-máquina, se emplean dispositivos como mamparas de protección o similares. Dado que para el sistema diseñado la dirección de proyección de los elementos es totalmente incontrolable (movimiento rotativo), estas deben ser analizadas (Figura 7.21).



**Figura 7.21** – Direcciones de proyección

Teniendo en cuenta tanto las direcciones de proyección como el objetivo del sistema de seguridad, se propone el diseño de una caja de protección. Esta caja se puede integrar en el proyecto de dos formas diferentes:

- La caja alberga en su interior todo el sistema (Figura 7.22(a)).
- La caja sólo protege los elementos móviles (Figura 7.22(b)).



**Figura 7.22** – Direcciones de proyección

Ambos diseños son aptos para los requerimientos del proyecto, no obstante, se selecciona el sistema de protección parcial por dos motivos:

- Mejorar la refrigeración del motor.
- Reducción del material empleado, ajustando de esta manera el coste de fabricación.

Una vez seleccionado el diseño general del dispositivo de protección es necesario determinar qué material se empleará para su posterior fabricación. Este material tendrá que cumplir con 2 parámetros:

- El material empleado tendrá que ser transparente, de tal forma que se pueda ver el sistema situado en el interior de la caja.
- Material con alta resistencia al impacto de objetos.

Siguiendo los requerimientos mencionados anteriormente, los materiales que se pueden emplear son: el metacrilato y el policarbonato.

#### ■ **Metacrilato (PMMA)** [11]

El metacrilato es un material plástico cuyas características principales son:

- Alto grado de transparencia (93 %).
- Alta resistencia al impacto (11 veces superior a la del vidrio).
- Gran ligereza.
- Material barato (1.67 - 1.84 €/kg).
- Facilidad de manipulación, corte y plegado.

#### ■ **Policarbonato** [12]

El policarbonato, al igual que el PMMA, es un material plástico que se caracteriza por:

- Alto grado de transparencia (88 %).
- Alta resistencia al impacto (hasta 250 veces superior a la del vidrio).
- Gran ligereza.



- Material económico (2.4 - 2.64 €/kg).
- Mayor complejidad de manipulación respecto del PMMA.

Analizando ambos materiales, se decide seleccionar el policarbonato ya que, pese a que su manipulación es un poco más compleja que el metacrilato, la resistencia al impacto es mucho mayor.

Por último, se tendrá que tener en cuenta, a la hora de diseñar la caja de protección, que el usuario debe poder acceder a las cargas, para poder cambiarlas, por lo que habrá que añadir al diseño un dispositivo de acceso seguro, como por ejemplo un final de carrera, que pare el funcionamiento del motor cuando el usuario quiera acceder al interior de la caja.

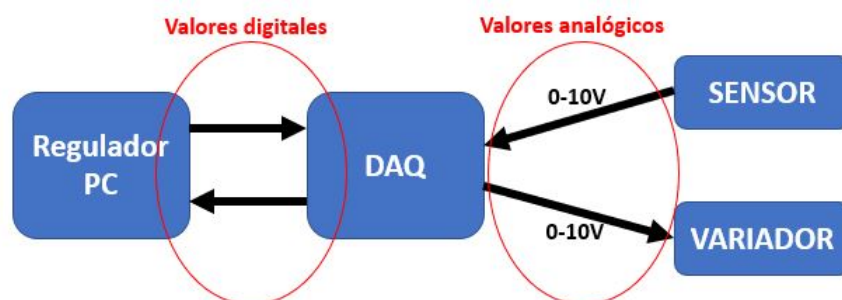
También será necesario añadir al diseño el método de fijación de la caja al tablero de soporte del proyecto. El diseño final del elemento de protección se explicará en el apartado 8.23.

## 7.7. Diseño de circuitos electrónicos de adaptación de señales y Tarjeta de Adquisición de Datos

### 7.7.1. Tarjeta de Adquisición

Para el presente trabajo, la tarjeta de adquisición de datos tendrá que encargarse de digitalizar los datos analógicos que genere el sistema de medición de velocidad, para que puedan ser interpretados por el regulador (PC). Además, también tendrá que transformar los datos digitales de salida del regulador (PC) convirtiéndolos en datos analógicos de tensión para ser interpretados por el variador.

La funcionalidad del DAQ puede resumirse en unir la parte analógica con la parte digital del sistema para que trabajen conjuntamente.



**Figura 7.23** – Funcionalidad de la DAQ para el presente proyecto

Como se recoge en el apartado 6.3 del presente proyecto, la DAQ tendrá que trabajar con señales de entrada y salida de 0 a 10 V.

Algunas de las propuestas para emplear como DAQ son:

	NI USB 6001 [13]	Raspberry Pi 3 Model B [14]	BeagleBone Black [15]	Arduino Uno [16]
<b>Funcionalidad</b>	DAQ	Microordenador	Microordenador	Microcontrolador
<b>Alimentación</b>	USB 5V	5V	5V	USB/5-12V
<b>Entradas analógicas</b>	8	-	7	6
<b>Salidas analógicas</b>	2	-	-	-
<b>Tensión I/O analógicas</b>	+10V	-	0-1.8V	0-5V
<b>Resolución</b>	14 bits	-	12 bits	10 bits
<b>Salidas PWM</b>	-	Sí	Sí	Sí
<b>Tensión PWM</b>	-	0-3.3V	0-3.3V	0-5V
<b>Integración</b>	Muy Alta	Baja	Baja	Alta
<b>Coste</b>	Muy Alto	Medio	Alto	Bajo

**Tabla 7.7** – Características posibles DAQ's

En la Tabla 7.7 se pueden observar las características de cada una de los posibles dispositivos que pueden funcionar como DAQ.

Para el presente proyecto se selecciona el microcontrolador Arduino Uno como DAQ, ya que presenta las siguientes ventajas frente al resto de opciones:

- Coste reducido.
- Amplio rango de tensión de alimentación.
- Dispone de entradas analógicas con una suficiente resolución.
- Alta integración de dispositivos.

Además de los factores indicados anteriormente, el Arduino Uno se utiliza en algunas plantas de nivel del Laboratorio de Optimización y Control de la escuela, presentando una funcionalidad adecuada.

Por otra parte, otro factor de selección del mismo, es que, el Arduino forma parte de la materia estudiada en el grado de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática impartido en la Escuela Universitaria Politécnica, por lo que su uso en este proyecto, al estar enfocado para la realización de pruebas por el alumnado de la escuela, resulta una muy buena opción.

Por contra, las características eléctricas del Arduino (tensiones entre 0/5V y no presentar salidas analógicas), presentan el inconveniente de tener que diseñar circuitos de adaptación de las señales de entrada y salida, para cumplir con los requisitos del sistema (Apartado 6.3).

De esta manera la DAQ estará compuesta por los circuitos de adaptación junto con la placa Arduino Uno como se puede ver en la siguiente imagen:

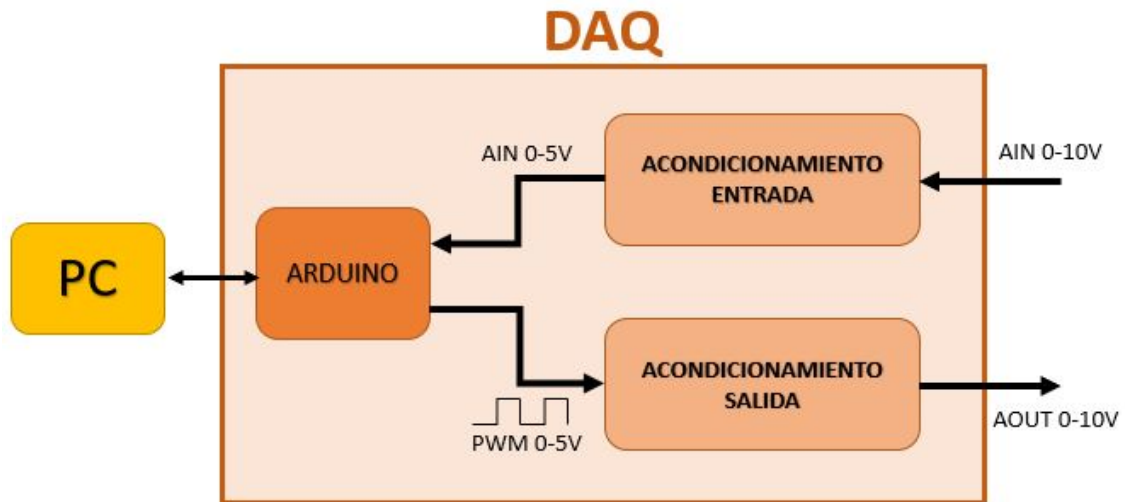


Figura 7.24 – Esquema DAQ

Los dos circuitos empleados para el acondicionamiento de la señal de entrada y de salida del DAQ, así como la programación del Arduino, serán explicados de forma detallada en el apartado 8.7.

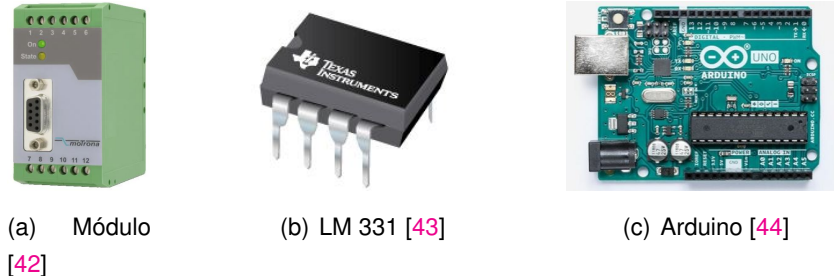
### 7.7.2. Diseño de circuitos electrónicos de adaptación de la señal de salida del sensor de velocidad

Como ya se explicó en el punto 7.4 del presente proyecto, el sensor seleccionado para la medición de la velocidad, genera una señal de salida en cuadratura, por lo que es necesario, para cumplir los requisitos de funcionamiento del sistema 6.2, acondicionar su señal de salida.

Este acondicionamiento se basa en transformar la señal generada por el codificador (tren de pulsos) en un valor de tensión de 0-10V proporcional a la velocidad de rotación del sistema. Para adaptar la señal de salida del encoder incremental se barajan las diferentes opciones:

- **Módulo de acondicionamiento para encoders incrementales:** este dispositivo se emplea en la industria para adaptar las señales de salida de los encoders incrementales, en un valor de tensión analógica, normalmente 0-10V. También pueden ofrecer acondicionamiento en lazo de corriente 4-20 mA o comunicación serial. La principal ventaja de estos dispositivos es que integran toda la electrónica necesaria para alimentar el codificador y para adaptar la señal. Por contra, al tratarse de un dispositivo de carácter industrial, su coste es elevado (Figura 7.25(a)).
- **Conversor frecuencia-voltaje a partir de circuito integrado:** otra de las posibilidades para acondicionar la señal de salida del encoder es usar un circuito integrado conversor frecuencia-voltaje, como por ejemplo el integrado LM331. Estos dispositivos generan una tensión analógica de salida proporcional a la frecuencia de la señal de entrada. Como principal ventaja presentan un coste muy bajo (Figura 7.25(b)).

- **Conversor frecuencia-voltaje por programación de microcontrolador:** Además de las opciones anteriormente explicadas, también se puede adaptar la señal del encoder por medio de programación empleando un microcontrolador estilo Arduino. Esta tecnología igual que la anterior, presenta un coste muy reducido (Figura 7.25(c)).

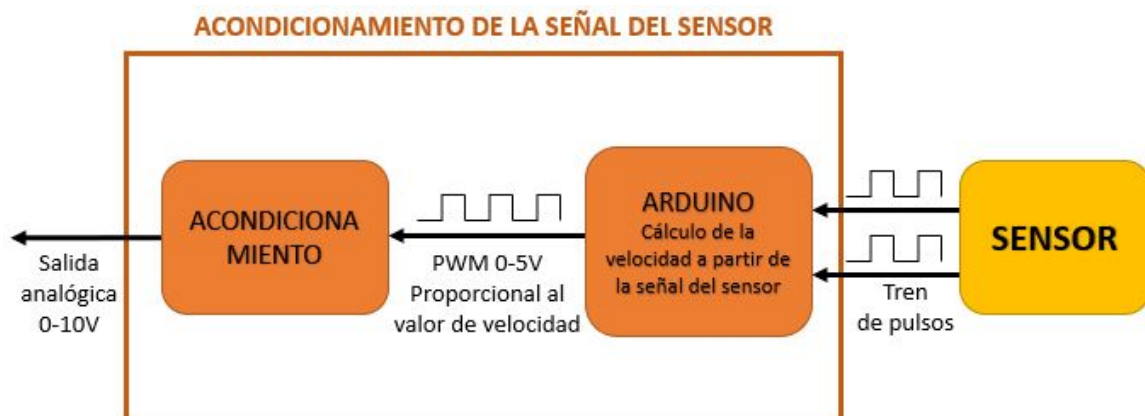


**Figura 7.25** – Posibles dispositivos de adaptación de la señal del encoder

Para el presente proyecto se barajaron, por sus reducidos costes, el uso de un microcontrolador Arduino para el acondicionamiento de la señal, así como el empleo de un convertidor frecuencia-voltaje empleando un circuito integrado. Estas dos alternativas se adaptaban perfectamente a las necesidades del proyecto pero finalmente se decidió emplear un Arduino para acondicionar la señal. Esta opción se seleccionó ya que aportaría una mayor flexibilidad al proyecto, es decir, con el uso de Arduino se podría implementar, en futuras modificaciones del sistema, encoders absolutos, como por ejemplo el AS5600, requiriendo únicamente de un cambio del algoritmo de adaptación para su correcto funcionamiento en el equipo.

Para esta etapa, se implementará un algoritmo de adaptación de señal en el microcontrolador Arduino, de tal forma que éste genere una señal PWM de ciclo de trabajo proporcional a la medición obtenida por el sensor.

Al igual que sucede a la hora de diseñar la DAQ con Arduino, puesto que éste no presenta salidas analógicas, para cumplir con los requerimientos de tensión de salida del dispositivo de medición de velocidad (Apartado 6.2), es necesario emplear un circuito de filtrado y amplificación de la señal, de tal forma que se obtenga una señal analógica 0-10V a partir de la PWM.



**Figura 7.26** – Disposición espacial de los elementos sobre el tablero

Otro factor a tener en cuenta en esta etapa es el modelo de microcontrolador empleado.

Dentro de la familia de microcontroladores Arduino, se encuentran diferentes modelos (Uno, Nano, Mega...) que se pueden diferenciar por el número de e/s tanto analógicas como digitales que presentan, así como por su tamaño.

Para el uso del microcontrolador en este sistema se pueden emplear los modelos más simples de Arduino, como Arduino Uno o Arduino Nano.

Finalmente se seleccionó el modelo Arduino Uno ya que se disponía de varias unidades en la escuela.

Tanto el código de programación del microcontrolador Arduino Uno, como el circuito de adaptación de la señal de salida, se explicarán en el apartado 8.5.

## 7.8. Selección de los equipos de alimentación del proyecto

El sistema incorpora elementos que trabajan con señales DC, por lo que será necesario obtener esta alimentación de la propia tensión de red (230V AC).

Para ello se consideran las siguientes opciones:

- **Fuente de alimentación comercial DC:** hoy en día se pueden encontrar fuentes de alimentación que ofrecen una salida DC de un voltaje determinado a partir de la señal alterna de alimentación.
- **Diseño de fuente de alimentación:** en esta opción se diseña el circuito de alimentación con el objetivo de obtener las tensiones necesarias en el proyecto. Este diseño debe de incorporar toda la electrónica necesaria para poder obtener las tensiones DC a partir de la tensión de alimentación AC.

Ya que el objetivo del presente trabajo es diseñar un sistema simple y modular, se empleará una fuente de alimentación comercial DC.

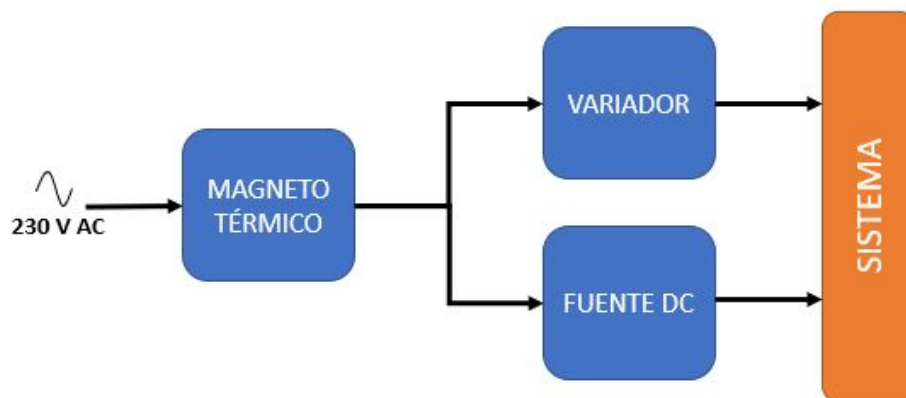
Además con el objetivo de poder alimentar directamente desde la fuente de alimentación a los componentes del sistema, se selecciona una fuente de alimentación DC de 12 V ya que los Arduinos empleados pueden trabajar con este valor de tensión.



Figura 7.27 – Fuente de alimentación DC [45]

Dentro de las fuentes de alimentación 12V DC se pueden encontrar una gran variedad de opciones disponibles en el mercado en función de su potencia (24W, 36W...). A partir del consumo del sistema se seleccionará la que más se ajuste a éste.

También se añadirá al diseño un interruptor magnetotérmico, de las características eléctricas requeridas, con el que proteger el sistema. Además, con el uso del citado magnetotérmico, el sistema podrá alimentarse eléctricamente a través de un único cable de alimentación, cumpliendo así uno de los requisitos de diseño 6.5.



**Figura 7.28** – Esquema simplificado de la alimentación del sistema

## 7.9. Disposición espacial de los elementos que conforman el sistema

Otro factor a tener en cuenta en cuanto al diseño, es la disposición espacial de todos los elementos que intervienen en el sistema:

- Sistema mecánico (motor, carga y sensor) + caja protectora.
- Variador de frecuencia.
- DAQ.
- Sistema de adaptación de la señal del sensor de velocidad.
- Interruptor general magnetotérmico.
- Fuente de alimentación DC para la electrónica del sistema.
- Elementos de protección del sistema (seta de emergencia).

Con el objetivo de simplificar el diseño del sistema, y proteger los elementos eléctricos, se diseñarán unas pequeñas cajas en 3D que albergarán la parte electrónica del proyecto.

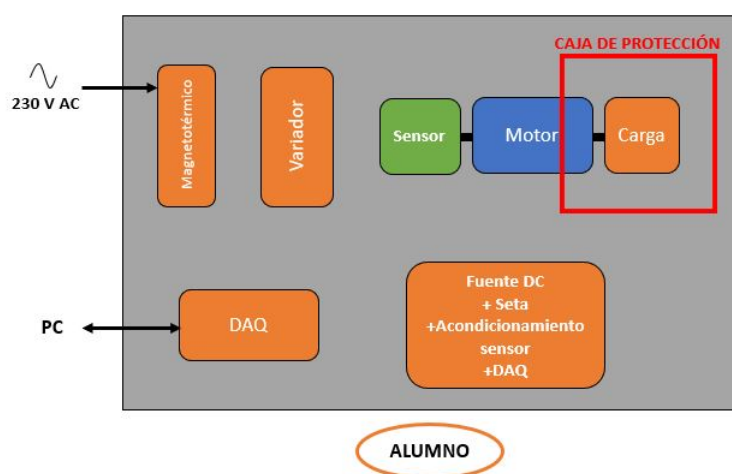
Además, siguiendo los requisitos hardware del proyecto, apartado 6.3, se separará el sistema de adquisición de datos del resto de elementos electrónicos, por lo que será necesario fabricar 2 cajas diferentes, una para el sistema DAQ y otra para la alimentación, el sistema

de adaptación de la señal del sensor y la gestión de los elementos de seguridad (seta de emergencia...).

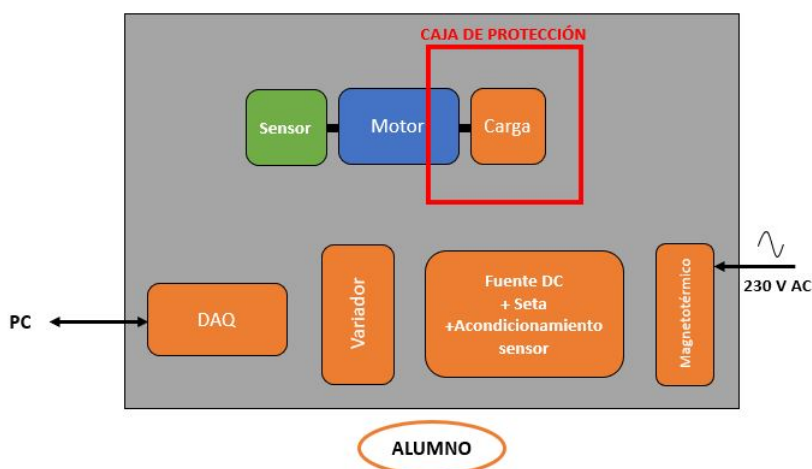
Por otra parte, y a consecuencia del carácter educativo del sistema, se dotará a las cajas de conectores hembra, tipo banana, para que los alumnos puedan realizar también el conexionado entre módulos.

Este conexionado sólo afectará a la parte de control y nunca a la de alimentación (tanto de los módulos como del propio motor).

La disposiciones espaciales que se barajan son las siguientes:

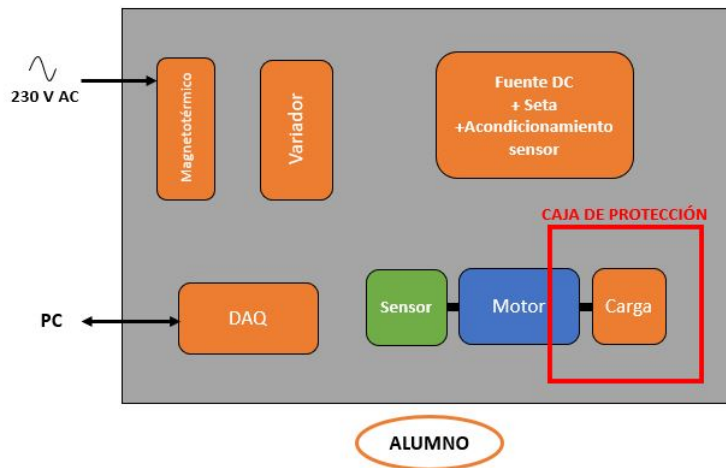


**Figura 7.29** – Disposición espacial de los elementos sobre el tablero (Opción 1)

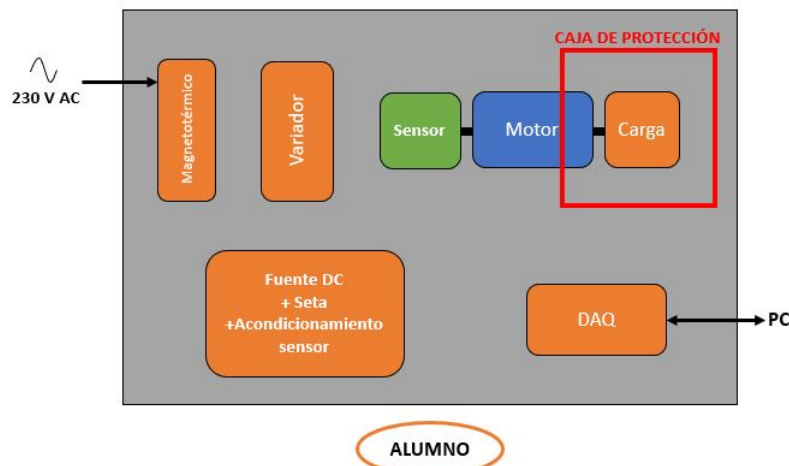


**Figura 7.30** – Disposición espacial de los elementos sobre el tablero (Opción 2)





**Figura 7.31** – Disposición espacial de los elementos sobre el tablero (Opción 3)



**Figura 7.32** – Disposición espacial de los elementos sobre el tablero (Opción 4)

Finalmente se seleccionó la primera disposición espacial, Figura 7.29, ya que es la opción que presenta un cableado más ordenado entre los diferentes elementos y, además, aleja al usuario de los componentes de mayor potencia (variador y motor).

## 7.10. Programación software para el control del equipo

El último punto a analizar, en cuanto al diseño del sistema, es la elección del programa de control empleado para diseñar el algoritmo PID de control de velocidad.

A consecuencia de que el presente proyecto está enfocado en la realización de prácticas de control por el alumnado de la escuela, es importante analizar los programas informáticos que se emplean actualmente en las distintas asignaturas relacionadas con el control de procesos. Así pues, se pueden diferenciar los siguientes software:

- **Matlab:** software de cálculo numérico, que implementa un entorno de desarrollo integrado y un lenguaje propio de programación. Además, este software presenta la ventaja de



facilitar diferentes paquetes, o toolboxes, diseñadas especialmente para realizar tareas de control de sistemas, así como un entorno de programación visual llamado Simulink.

Matlab se emplea en varias asignaturas de control de procesos del Grado de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática.

- **Labview:** software desarrollado por el fabricante National Instruments para el diseño de sistemas de pruebas, medidas y control. Este programa se caracteriza por implementar un lenguaje de programación visual, similar a Simulink.

Labview se emplea en la asignatura de Instrumentación Electrónica I impartida para los alumnos del Grado de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática.

Otra alternativa podría ser el empleo del software de cálculo Octave, que también se utiliza en la universidad en las asignaturas de Cálculo, Álgebra y Ecuaciones Diferenciales. No obstante, esta opción no se llega a barajar pues este programa no está tan enfocado al control de procesos como los anteriormente citados.

Para el presente trabajo se diseñará el algoritmo de control empleando Matlab, ya que es el principal programa con el que se trabaja en la escuela en el ámbito del control automático. Además, otro factor para justificar su selección, es que, aunque ambos programas (Matlab y Labview) se pueden comunicar con el Arduino (DAQ), en el caso de Matlab se dispone de funciones, o scripts, que simplifican la recepción y el envío de datos a la tarjeta de adquisición de datos.

## 8 RESULTADOS FINALES

Presentadas las diferentes alternativas en cuanto al diseño del presente proyecto, se procederá a explicar la solución adoptada. Con el objetivo de estructurar este apartado, éste se diferenciará en etapas, las cuales sirvieron de guía para la consecución del banco de pruebas. Estas etapas son:

- Elección de la disposición mecánica del sistema.
- Selección del motor eléctrico.
- Selección del variador de frecuencia.
- Elección y disposición del sensor de velocidad.
- Adaptación de la señal del sensor.
- Diseño de las cargas del sistema.
- Diseño de la tarjeta de adquisición de datos.
- Diseño de la caja de protección.
- Selección del material eléctrico auxiliar.
- Sistemas de protección de los dispositivos eléctricos y electrónicos empleados.
- Disposición espacial de los diferentes elementos que intervienen en el sistema.
- Fabricación de las piezas 3D.
- Programación software del algoritmo de control para el correcto funcionamiento del banco de pruebas.
- Montaje y puesta en marcha del sistema.
- Resultados obtenidos y conclusiones.

### 8.1. Elección de la disposición mecánica del sistema

Como ya se comentó brevemente en el apartado 7.1, la selección de la disposición mecánica del sistema corresponde con la presentada en la Figura 7.4, es decir, la carga se acopla al eje delantero del motor y el sensor se colocará en el eje trasero.

La selección de esta opción aporta una gran robustez y simplicidad al sistema ya que todos los elementos tienen un contacto directo con el eje del motor, reduciendo en gran medida los problemas mecánicos del diseño propios de los acoplamientos de ejes.

Es importante destacar que esta disposición mecánica sólo puede ser implementada con el uso de un motor de eje extendido, es decir, se debe de poder acceder al eje por la parte posterior del mismo.

## 8.2. Selección del motor eléctrico

En el apartado 7.2 del presente proyecto se presentaron las diferentes características y propuestas a la hora de seleccionar el motor.

Además de las características eléctricas, el motor también tendrá que presentar un tipo de montaje por patas (brida B3), y una extensión de eje por la parte trasera para poder adaptarse al diseño mecánico del sistema.

Por otro lado, para acotar la selección del modelo empleado, se decidió utilizar un motor con rotor en jaula de ardilla (Apartado 3.2.1), ya que el mantenimiento que necesitan este tipo de motores es mínimo y además presentan un coste reducido.

Bien es cierto que en el mercado se pueden encontrar una gran variedad de motores de distintas marcas que se ajustan a las necesidades del proyecto, por lo que, a la hora de seleccionar un modelo final se siguió un criterio económico.

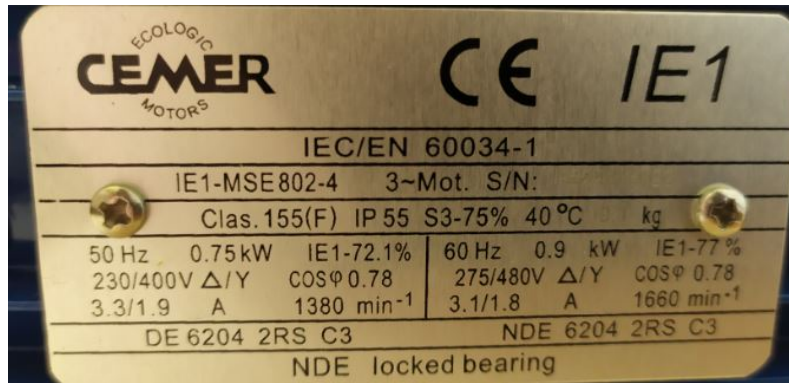
De esta forma el motor seleccionado fue el modelo CEMER IE1-MSE802-4 del fabricante Cosgra.



**Figura 8.1** – Vista general del motor [46]

Esta selección se debe a que, dentro de la amplia gama de motores que cumplían con las características mecánicas y eléctricas del proyecto, era la opción que presentaba un menor coste.

Las características principales de este motor, además de poder verlas en su placa (Figura 8.2), se pueden ver reflejadas de una forma más detallada, en la Tabla 8.1.



**Figura 8.2** – Placa de características del motor

Características motor	
Modelo	MSE802-4
Potencia	0.75kW (1 CV)
Tipo de motor	Asíncrono (rotor jaula de ardilla)
Tipo de alimentación	Trifásica
Tensión	230/400V - 50Hz
Corriente nominal	3.3/1.9 A
Nº de polos	4
Velocidad sincronismo	1500 r.p.m.
Velocidad en carga	1380 r.p.m.
Eficiencia energética	IE1-72.1 %
Aislamiento	155 F
Material de la carcasa	Aluminio
Peso	9.1kg
Montaje constructivo	Por patas (Brida B3)
Extensión del eje	Sí

**Tabla 8.1** – Características del motor seleccionado [17]

Este modelo, al igual que la amplia mayoría de motores eléctricos de sus mismas características eléctricas, presenta una extensión de eje en la parte trasera para acoplar el sistema de refrigeración del motor, conformado normalmente por unas aspas de plástico acopladas al eje trasero. Este sistema suele incorporar un protector metálico que se fija a la carcasa del motor.

En este modelo la carcasa está fijada al chasis del motor mediante tornillos estrella por lo que desatornillándolos se puede quitar el protector y acceder al eje trasero, como se puede ver en las siguientes imágenes.



(a) Con protector



(b) Sin protector

**Figura 8.3** – Parte trasera del motor

Es importante destacar que, para el modelo seleccionado, el eje trasero no tiene la misma forma que el eje delantero, ya que éste presenta un eje circular con chaveta, Figura 8.4, mientras que el trasero presenta un pequeño chaflán, Figura 8.3(b). Además, las dimensiones tampoco son las mismas, puesto que el eje delantero es de 19 mm de diámetro mientras que el eje trasero es de 20 mm.

**Figura 8.4** – Eje delantero del motor seleccionado

### 8.3. Selección del variador de frecuencia [18]

Para el variador de frecuencia, como ya se adelantó en el apartado 7.3, se seleccionó el modelo ATV312H075M2 de la casa Schneider.

Este modelo, además de cumplir con los requerimientos eléctricos y funcionales del proyecto, es el variador empleado en las plantas de nivel, Figura 3.2, presentando una gran robustez y rendimiento, así como un muy buen funcionamiento.

Bien es cierto que no es el modelo más barato de los presentados en la tabla 7.3, pero la universidad dispone de algunas unidades disponibles para la realización de proyectos.

Las principales características de este modelo se recogen en la siguiente tabla:

Características variador	
Modelo	ATV312H075M2
Potencia del motor	0.75kW (1 CV)
Tipo de motor	Asíncrono
Alimentación del motor	Trifásica
Tipo de alimentación	Monofásica
Tensión	200/240V - 50Hz/60Hz
Corriente de línea	8.9A (200V) / 7.5A (240V)
Potencia disipada	60 W
Rango de velocidades	1...50
Aislamiento	Eléctrico alimentación-control
Entradas analógicas	3
Tipo de entrada analógica	0/10V...+/-10V...0-20mA
Entradas digitales	6
Tipo de entrada digital	24V...0/100mA (PLC)
Dimensiones	142x75x145 mm
Peso	1.5 kg

**Tabla 8.2** – Características del variador seleccionado [18]

Este variador dispone de tres entradas analógicas con las que regular la señal de salida del dispositivo. Una de estas señales analógicas, en concreto la AI1, trabaja con valores de tensión 0/10V por lo que ésta será la entrada de señal de control del variador que se utilice en el proyecto, ya que se adapta a los rangos de tensión con los que trabaja la DAQ.

Por otra parte, este modelo también incluye un amplio número de entradas digitales, en concreto seis, con las que regular diferentes aspectos de funcionamiento como el sentido de giro, la puesta en marcha, o el paro del sistema entre otros.

Para el banco de pruebas se trabajará únicamente con la entrada digital de puesta en marcha/paro que corresponde con la entrada LI1, para un control de dos hilos. Esta entrada digital pone en marcha el variador cuando recibe una señal de 24V y, por el contrario, para el sistema cuando deja de recibirla. El variador está equipado con una salida de tensión de 24V con la que poder controlar las diferentes entradas digitales por lo que no es necesario obtener los 24V de forma externa.

Una peculiaridad de la entrada LI1 es que debe activarse después de alimentar el variador para poder poner en marcha el dispositivo. En caso de que esta entrada esté activada en el momento de dar tensión al variador, éste no llegará a activarse y será necesario desactivar la entrada y volverla a activar para iniciar el funcionamiento. Debido a esto, y con el objetivo de automatizar la puesta en marcha del sistema, se empleará un temporizador con el que se activará la señal LI1 un tiempo determinado después de dar alimentación al variador.

Además, los variadores también incluyen diferentes tipos de protección, con el objetivo de, tanto proteger su circuitería como el propio motor. El ATV312H075M2 incluye los siguientes

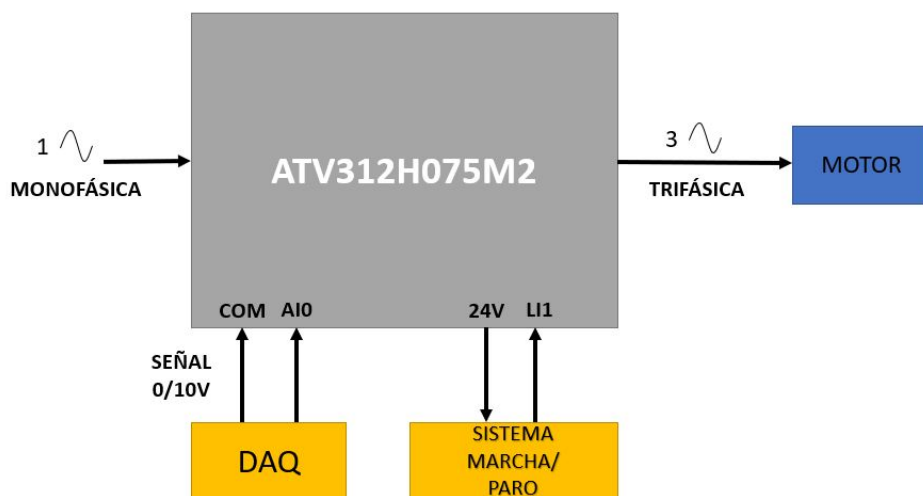
tipos de protecciones:

- Interrupción en la fase de entrada.
- Circuitos de seguridad de sobretensiones de la alimentación de línea.
- Protección térmica contra sobrecalentamiento.
- Interrupción de alguna fase de la alimentación del motor.
- Protección contra cortocircuitos entre fases del motor.



**Figura 8.5** – Variador de frecuencia ATV312H075M2 [18]

Para el presente trabajo el variador de frecuencia será el encargado de suministrar la señal trifásica de alimentación del motor eléctrico determinada a partir de la tensión recibida por la entrada analógica AI1 (señal de salida del DAQ). Además tendrá que parar el sistema cuando lo requiera el usuario.



**Figura 8.6** – Esquemas de conexión del variador

## 8.4. Elección y disposición del sensor de velocidad [19]

En el apartado 7.4 se pueden observar los diferentes problemas mecánicos que presentaban los sensores con tipo de montaje eje saliente y eje pasante. Por ello, la selección del sensor, se redujo a los dispositivos que son capaces de medir la velocidad de rotación sin necesidad de contacto con el eje. De los diferentes modelos expuestos en la tabla 7.6, el sensor de velocidad seleccionado es el codificador magnético del fabricante Pololu con un imán de 20 c.p.r.

Este tipo de codificadores están diseñados para acoplarse en la parte trasera de los micro motores DC, usados en pequeños robots, aunque para los requerimientos del presente trabajo, esta clase de sensores son completamente funcionales.



**Figura 8.7** – Codificador magnético Pololu [19]

La selección de este codificador se debe principalmente a tres factores:

- Facilidad de adaptación mecánica al sistema, ya que no necesita de contacto físico con el eje de rotación.
- Dentro de los sensores magnéticos estudiados, es el que mayor resolución presenta (20 C.P.R.).
- Sensor muy económico.

Las principales características de este codificador son las siguientes:

Características codificador magnético	
Tipo de codificador	Magnético
Tipo de salida	Cuadratura
Nº de canales de salida	2
Tensión de alimentación	2.7 -18V
Resolución	20 C.P.R.
Dimensiones	20x16mm

**Tabla 8.3** – Características del codificador seleccionado [19]

En la figura 8.7 se puede observar cómo el codificador dispone de 6 pines de conexión:

- Vcc: alimentación positiva del sensor.

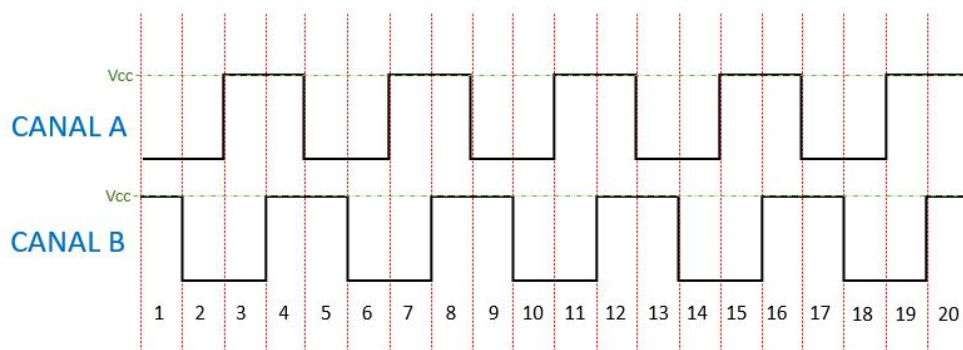


- GND: común de la alimentación.
- A, B: canales de salida.
- M1, M2: alimentación externa para micro motores (estos pines no se utilizarán en este proyecto).

Para obtener la salida en cuadratura, este codificador utiliza dos sensores Hall, modelo TLE4946-2K de la marca Infineon, dispuestos de forma estratégica sobre la placa del encoder para que se produzca un pequeño desfase entre las señales, Figura 8.7.

Para activar los sensores Hall y poder generar los pulsos de salida, el codificador viene equipado con un disco imantado dispuesto de 10 polos que debe ser acoplado al eje de rotación del sistema a medir. De esta forma, al girar el imán, y en función del polo que pasa por encima de los sensores Hall, estos se activan y desactivan, es decir, o cortan o dejan pasar la corriente eléctrica de alimentación del encoder produciendo el tren de pulsos típico de las señales de salida de estos sensores.

Para este modelo de codificador, el tren de pulsos que genera a la salida oscila entre 0 y el valor de la tensión de alimentación, ya que los sensores efecto Hall simplemente se emplean como interruptores, por lo que, a consecuencia de que su resolución es de 20 C.P.R., la señal de salida ofrecida para una revolución del eje del sistema correspondería con la expuesta en la siguiente imagen:



**Figura 8.8** – Señal de salida del encoder magnético 20 C.P.R.

Como se puede observar en la Figura 8.8, para poder obtener la máxima resolución del sensor es imprescindible leer tanto los flancos de subida como los de bajada de ambas señales.

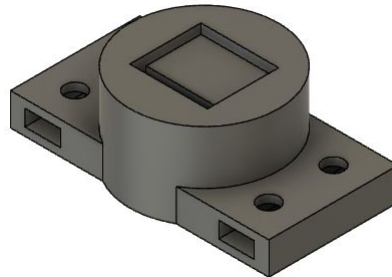
También es importante destacar que, para que el sistema funcione de forma correcta, el imán debe de estar a una distancia reducida, entre 1 y 2 mm, y una posición centrada, con respecto a los sensores Hall del codificador, por lo que será muy importante el cómo y dónde se coloca dicho sensor.

#### 8.4.1. Soporte y colocación del sensor

Como ya se indicó anteriormente, tanto el sensor como el disco imantado, deben de colocarse de forma centrada y muy juntos, sin que se lleguen a rozar, por lo que fue imprescindible

diseñar un soporte que garantizara una distancia y colocación adecuada.

En un primer momento se diseñó un soporte que se acoplaba a la carcasa de protección del ventilador. Este soporte, tendría una altura tal que, entre el encoder y el disco de imanes, el cual iría pegado en el eje trasero, hubiera una distancia de un par de milímetros como mucho. Su diseño se puede ver en la siguiente imagen.



**Figura 8.9** – Diseño inicial del soporte del sensor

Como medio de fijación entre el soporte y la carcasa se emplearon cuatro tornillos dispuestos de arandelas y tuercas, las cuales iban colocadas en los agujeros cúbicos del soporte, ya que el diseño estaba pensado para fabricar la pieza con una impresora 3D, con la que es muy difícil realizar agujeros roscados. Además, el sensor se situó en el espacio cuadrado central, utilizando silicona caliente para pegarlo al soporte.

Una vez diseñado el soporte, se procedió a su fabricación y a la realización de pruebas para comprobar la funcionalidad del diseño.

Después de realizar varias pruebas de medición, empleando para ello un osciloscopio, se pudo observar cómo la señal que se obtenía con este soporte no era estable y se producían cambios bruscos de la frecuencia de la señal sin alterar la velocidad de rotación del motor.

Analizando las posibles causas de estos errores de medición se concluyó de forma experimental que el problema residía en dos motivos.

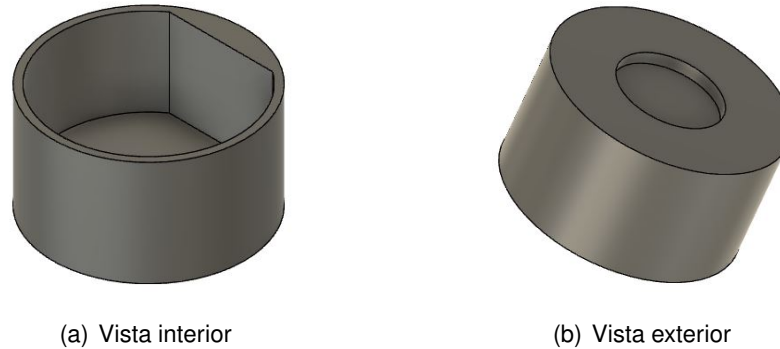
- Por un lado, la carcasa de protección del ventilador, al ser de aluminio, interactuaba con el propio campo magnético producido por el motor e interfería en la lectura del codificador.
- El imán, al ir pegado al eje de manera manual, sin asegurar su correcta colocación, pudiera ser que no estuviera lo suficientemente centrado como requería el codificador, interfiriendo en el correcto funcionamiento de los sensores Hall del dispositivo.

Por estos dos motivos, fue necesario replantear por completo el diseño, tanto de la fijación del imán como el del propio soporte del sensor.

En cuanto al soporte del imán, y con el objetivo de obtener un correcto centrado del mismo en el eje, se diseñó una pequeña funda con la forma y dimensiones del eje trasero del motor, en la que en su extremo se presenta un pequeño vaciado circular del diámetro del disco imantado en el que colocar, a presión, el citado disco.

Con este diseño se logra un centrado muy preciso y, además, se evita el tener que pegar el imán, facilitando su reemplazo cuando sea necesario.

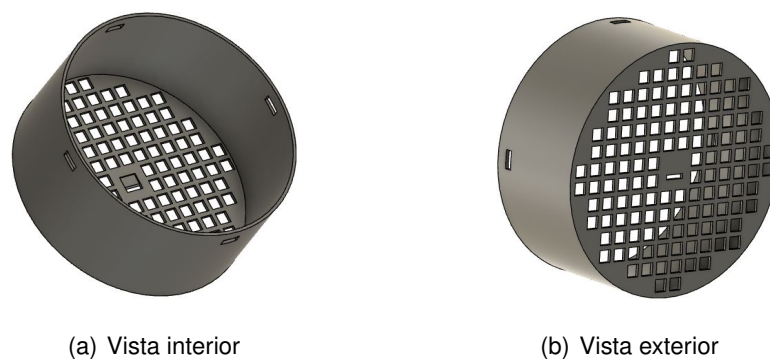
Esta funda se diseña para la fabricación en plástico por medio de la impresión 3D, como se puede ver en la Figura 8.10.



**Figura 8.10** – Diseño del soporte del disco imantado

Por otro lado, se procedió a diseñar una nueva carcasa de protección del sistema de ventilación del motor, que a su vez, serviría de soporte del sensor. Esta carcasa se fabricaría en plástico por medio de una impresora 3D, por lo que ésta no interactuaría con el campo magnético generado por el motor, evitando de esta manera las posibles interferencias en la medida.

Además, esta carcasa fue dispuesta con el tamaño exacto para que, entre el imán y el sensor, la distancia fuera mínima. Al igual que la carcasa metálica original, la nueva protección se fijará por medio de tornillos al chasis del motor.



**Figura 8.11** – Diseño de la carcasa de protección del ventilador y soporte de sensor

Es importante destacar que, para el diseño final del soporte, se tuvo en cuenta que se empleará la versión de menor tamaño del sensor, con medidas 11,6x10,6 mm, ya que fue el único modelo que se pudo obtener debido a problemas de stock del modelo más grande.

Salvo las dimensiones, el resto de funcionalidades de este sensor, son iguales que las que presenta el codificador explicado en el presente apartado.

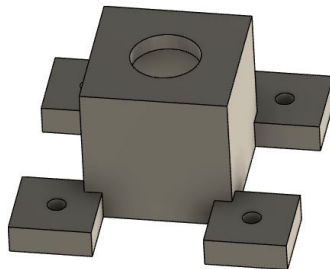
Otro factor a tener en cuenta, es que, para facilitar la conexión eléctrica del sensor, se diseña un pequeño soporte para colocar un conector macho de 4 pines (M4), que se fija a la

carcasa del sistema de ventilación. De esta manera, se facilitará la conexión/desconexión del sensor y se protegerán las pequeñas conexiones eléctricas del mismo.



**Figura 8.12** – Conector 4 pines macho [47]

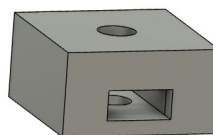
El soporte diseñado es el expuesto a continuación en la Figura 8.13.



**Figura 8.13** – Soporte para la conexión del sensor

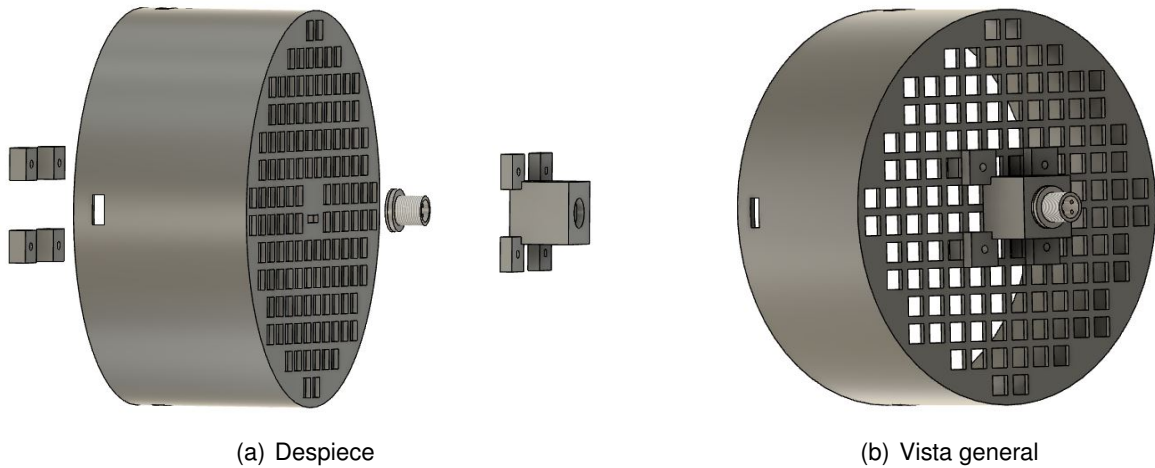
Como se puede observar, el diseño dispone de un vaciado central donde albergar el cableado entre el conector y el sensor, así como, 4 salientes en los que se situarán los tornillos para fijarlo a la carcasa. El conector M4 se situará en el orificio central del diseño.

Además, puesto que esta pieza también se fabricará con una impresora 3D, se diseñan unos pequeños soportes para las tuercas de acople a la carcasa (Figura 8.14).

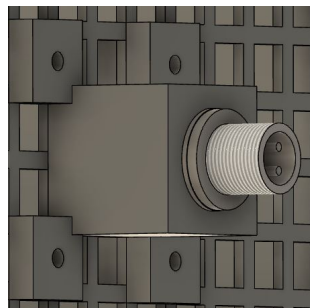


**Figura 8.14** – Soporte para la tuerca de fijación

Tanto el despiece como el resultado final del diseño se pueden observar en las Figuras 8.15 y 8.16.



**Figura 8.15** – Conjunto protector + soporte conexión



**Figura 8.16** – Plano detalle del soporte de conexión

## 8.5. Adaptación de la señal de salida del sensor

Otro factor a tener en cuenta a la hora de emplear un codificador en cuadratura, y con el objetivo de cumplir con los requisitos del proyecto (Apartado 6.2), es que es necesario adaptar su señal de salida, tren de pulsos, en una señal analógica de 0/10V.

En el punto 7.7.2 se pueden observar las diferentes alternativas que se pueden adoptar para acondicionar esta señal, así como, los motivos por los que se seleccionó el microcontrolador Arduino Uno como solución.

Por otra parte, las características principales de este microcontrolador, la configuración de sus pines y sus funcionalidades, se recogen en el apartado 12.1.

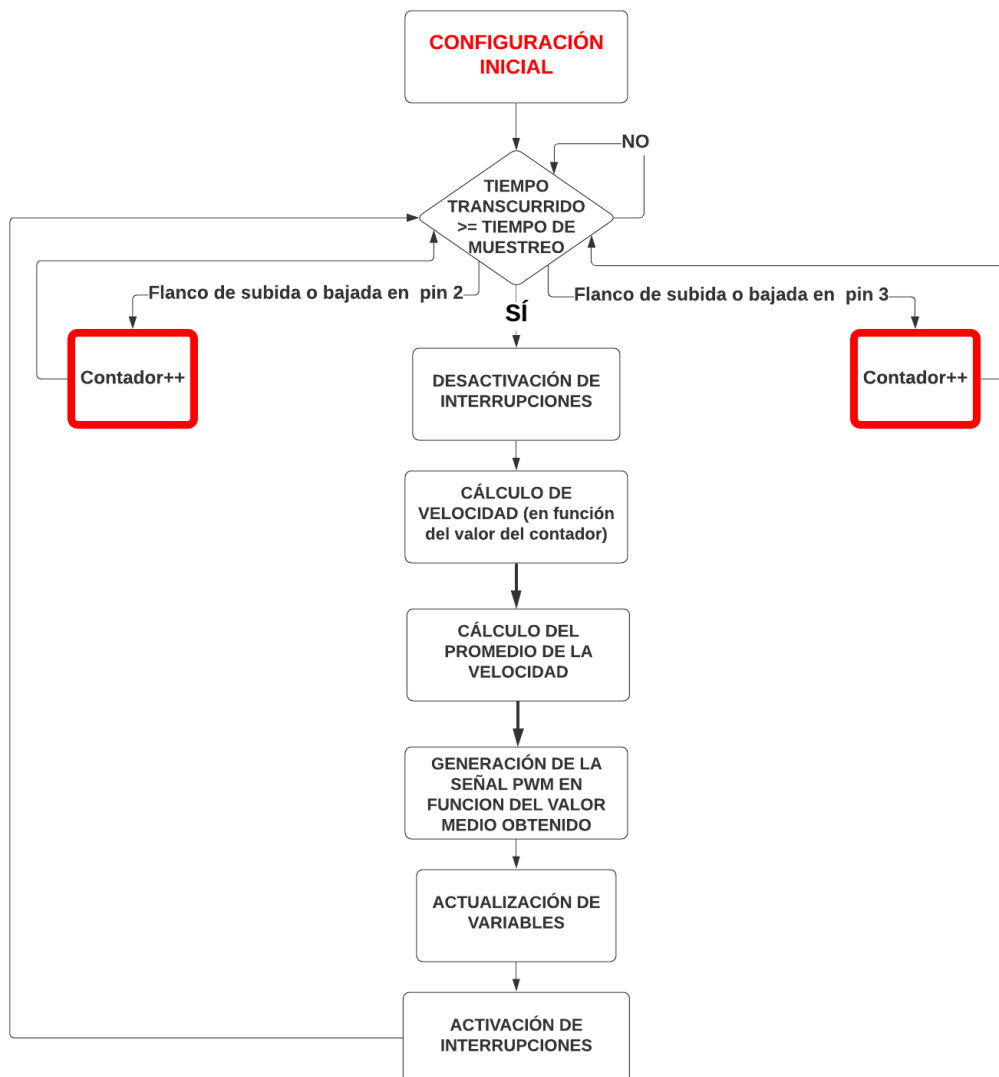
No obstante, para la adaptación de la salida del codificador magnético empleado en el trabajo será necesario utilizar los siguientes pines:

- 2 pines de entrada digital, para detectar los dos canales de salida del sensor. Como ya se presentó en la Figura 8.8, será necesario, para conseguir la máxima resolución de la medida, detectar tanto los flancos de subida como los de bajada de la señal, por lo que, para optimizar el diseño software, se emplearán los dos pines de interrupción disponibles (2 y 3). Bien es cierto que el cambio de valores de la señal de entrada se podría realizar por polling, empleando cualquier otro pin digital de propósito general.

- Como los pines de entrada digital trabajan con valores de 0-5V, y a consecuencia de que la señal de salida del sensor depende directamente de la tensión de alimentación del mismo, se utilizará el pin de alimentación 5V del microcontrolador. Lógicamente también se empleará el pin GND con el que referenciar dicha tensión. De esta forma, los valores de la señal de salida del sensor podrán ser interpretados por los pines de interrupción, ya que los valores oscilarán entre 0 y 5 V.
- Por último, como consecuencia de que el microcontrolador Arduino no dispone de pines de salida analógicas, se empleará uno de los pines con salida PWM.

### 8.5.1. Programación software para el acondicionamiento de la señal del sensor

El diagrama de bloques asociado al algoritmo diseñado para el acondicionamiento de la señal del codificador de velocidad es el expuesto en la Figura 8.17.



**Figura 8.17** – Diagrama de bloques de la programación para la adaptación de la señal

De forma general, el algoritmo diseñado se encarga de generar una señal PWM con un ciclo de trabajo proporcional a la velocidad medida por el codificador. No obstante, en el apartado 12.2, se procede a explicar de forma detallada el algoritmo diseñado y las funciones utilizadas.

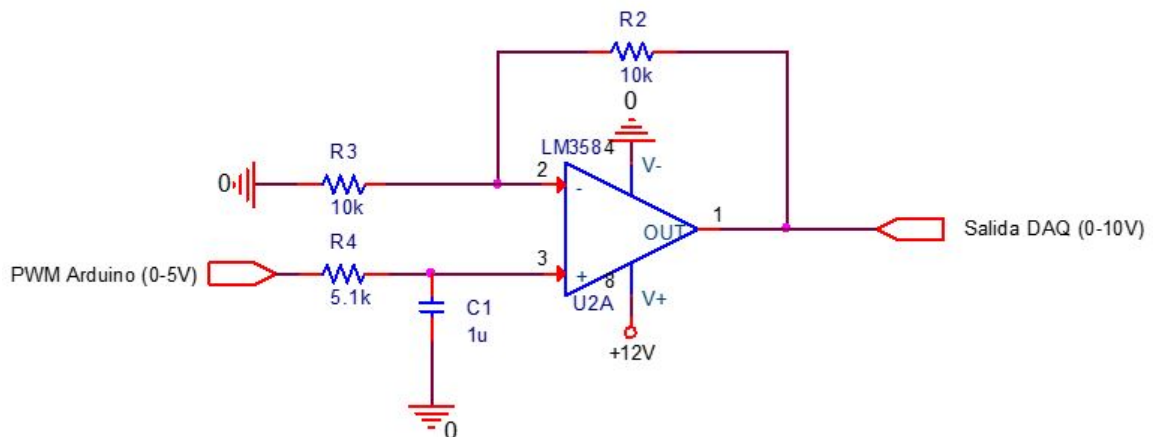
Por otro lado, el código empleado se presenta en el apartado 12.6.1.1 del presente proyecto.

### 8.5.2. Circuito de adaptación de la señal PWM

Otro factor a tener en cuenta es que será necesario acondicionar la señal de salida PWM del Arduino para cumplir con los requerimientos del proyecto (Apartado 6.2).

De esta forma será necesario obtener una tensión analógica 0/10V a partir de la señal PWM generada por el microcontrolador.

Para poder realizar este proceso, se deberá proceder a un filtrado de la señal modulada, con el que se obtenga una tensión analógica entre 0 y 5V, y seguidamente, amplificarla, para obtener valores entre 0 y 10V. Para ello, se diseña el circuito electrónico de la Figura 8.18:



**Figura 8.18** – Circuito de adaptación de la señal de salida del Arduino

Como se puede observar en la Figura 8.18, el circuito consta de un filtro paso bajo cuya salida se conecta a un amplificador no inversor de ganancia 2, de tal forma que, en el filtro, se obtiene únicamente el valor de continua de la señal, es decir, el valor medio de la señal PWM de salida del Arduino, que será amplificado al doble de su valor, por medio del circuito no inversor.

Para el diseño de este circuito se seleccionó un amplificador operacional LM358 por los siguientes motivos [20]:

- Este A.O. soporta tensiones de alimentación unipolar de hasta 32V por lo que se puede alimentar con la fuente de alimentación de 12 V DC del proyecto.
- Pese a no tratarse de un A.O. *Rail To Rail*, la tensión de salida que ofrece, se ajusta a los parámetros del sistema, ya que, la tensión máxima, corresponde con el valor de la tensión de alimentación menos 1,5V, por lo que, en este caso será de 10,5V (suficiente para las necesidades eléctricas del proyecto).

El dimensionado del resto de componentes se calcularán en el apartado 11.1.1.

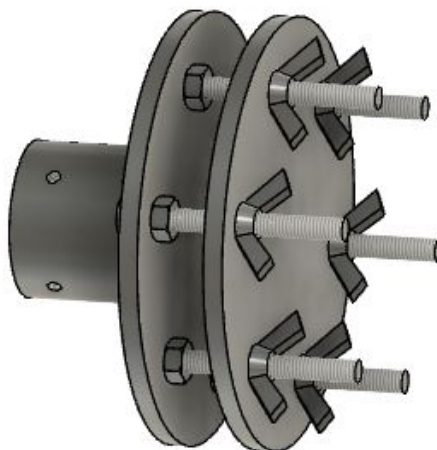
Por último, destacar que, debido a la simplicidad de este circuito y a la imposibilidad de acceder al Laboratorio de Electrónica de la escuela, éste se realizará sobre una placa perforada de baquelita en vez de montarlo sobre una PCB.

## 8.6. Diseño de las cargas del sistema

En cuanto a las cargas del sistema, como ya se recogió en el apartado 7.5, se procederá a diseñar un acople adaptado a la forma y dimensiones del eje delantero del motor que servirá de soporte de las diferentes cargas. Además, este diseño deberá de cumplir con dos factores:

- El diseño deberá facilitar el posible cambio de cargas.
- Las cargas deberán de asegurar que se generan fuerzas inerciales con el objetivo de obtener las especificaciones del transitorio típicas de los sistemas subamortiguados.

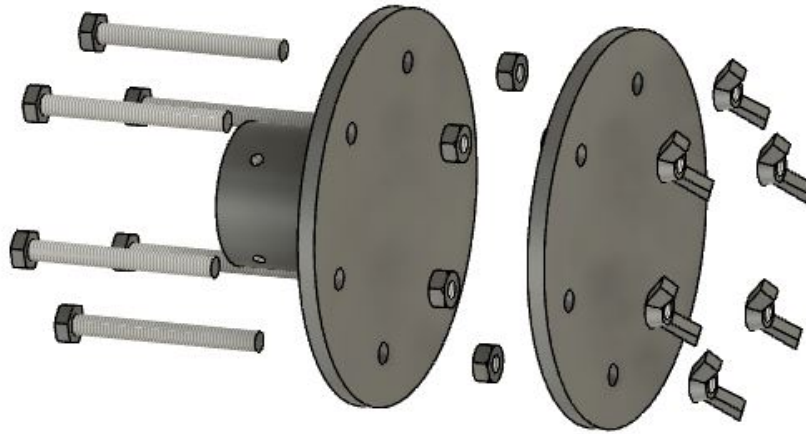
El diseño seleccionado se puede observar en la Figura 8.19.



**Figura 8.19** – Conjunto acople y cargas

Si analizamos el despiece del diseño, se pueden diferenciar las diferentes partes que lo componen.





**Figura 8.20** – Despiece cargas y acople del motor

Como se puede observar en la Figura 8.20, el diseño está compuesto principalmente por dos partes:

■ **El soporte de las cargas.**

El soporte es el encargado de acoplarse al motor y servir de base del sistema y de las propias cargas. Para unirse al motor, éste presenta un vaciado del tamaño y forma del eje delantero del motor. Además, dispone de un conjunto de orificios roscados, en los que se situarán unos pequeños tornillos de apriete con los que asegurar una sujeción máxima al eje.

Estos orificios están diseñados para tornillos de métrica 4 con un paso fino de 0,5 (típicos en sistemas de apriete de estas características).

También se puede apreciar cómo el soporte dispone de un pequeño disco dispuesto de 6 orificios pasantes en los que se fijarán, por medio de tuercas, seis tornillos de métrica 6 que servirán para colocar las diferentes cargas.

■ **Las cargas.**

Por otro lado, las cargas del diseño simplemente corresponden con unos discos en los que se sitúan, con la misma disposición que en el soporte, seis agujeros pasantes para poder introducir los tornillos de sujeción del soporte y colocar las cargas. Estos tornillos serán de métrica 6.

Para poder disponer de distintas cargas éstas podrán tener grosores diferentes, y por consecuencia pesos diferentes. Además, también será posible acoplar más de un único disco al eje. Estas cargas se fijarán al sistema por medio de seis palometas roscadas de métrica 6.

Es importante destacar que tanto los discos de carga como el propio soporte deben de ser fabricados en metal, ya que éstos tendrán que soportar importantes fuerzas de torsión, así como, presentar un cierto peso para que el motor se vea “frenado”. De esta manera esta pieza tendrá que ser mecanizada.

## 8.7. Diseño de la tarjeta de adquisición de datos

Otro aspecto a tener en cuenta en el diseño es el propio sistema de adquisición de datos (DAQ), que será el encargado de aunar el proceso (sistema analógico), con el PC (sistema digital). La DAQ recibirá la señal analógica del sensor y la digitalizará para poder ser interpretada por el ordenador. Del mismo modo, se convertirán las señales digitales de salida del ordenador en analógicas, para poder ser interpretadas por el variador (Figura 7.23).

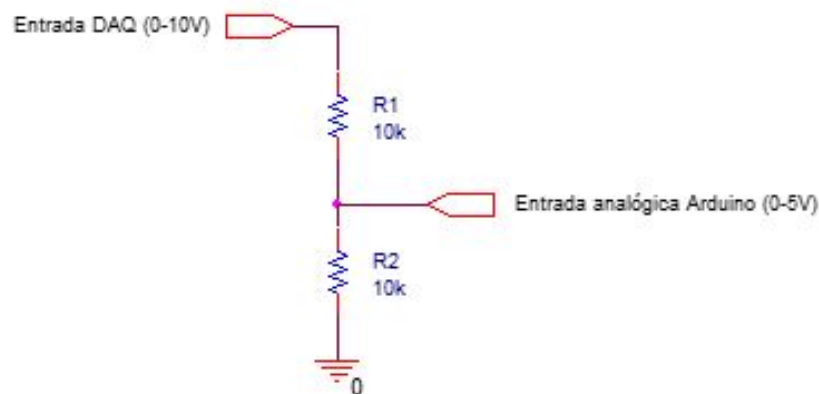
En el apartado 7.7.1 se comentaron las diferentes alternativas que se podían adaptar, así como las razones por las que se seleccionó el microcontrolador Arduino Uno para este proyecto.

Ya que el sistema debe de cumplir con los requerimientos del proyecto 6.3, y a consecuencia de las características del microcontrolador Arduino (Tabla 12.1), será necesario acondicionar tanto la señal de entrada como de salida del mismo por medio de dos circuitos diferentes. El esquema de la DAQ corresponde con la Figura 7.24, expuesta en el análisis de soluciones.

### ■ Circuito de adaptación de la señal de entrada.

Uno de los requisitos de la DAQ es que, su entrada analógica, trabaje con valores de tensión entre 0 y 10V, por lo que, como consecuencia de que las entradas analógicas del microcontrolador Arduino sólo trabajan con un rango de tensiones de 0/5V, es necesario diseñar un circuito que acondicione la señal 0/10V de entrada, en una tensión 0/5V.

Para realizar esta función, el circuito empleado será un simple divisor de tensión que reduzca la tensión de entrada a la mitad de su valor.



**Figura 8.21** – Circuito de acondicionamiento de la señal de entrada DAQ

Los cálculos relacionados con el dimensionado de los componentes del divisor de tensión se recogen en el punto 11.1.2.1 del presente proyecto.

### ■ Circuito de adaptación de la señal de salida.

Por otra parte, también será necesario adaptar la señal de salida del Arduino DAQ, ya que, al igual que sucedía a la hora de adaptar la señal de salida del codificador de

velocidad, se necesita obtener una señal analógica 0/10V a partir de la PWM generada por el microcontrolador Arduino. En este caso, al tratarse del mismo problema que con la adaptación de la salida del Arduino de acondicionamiento del sensor, se empleará el mismo circuito (Figura 8.18). De esta forma se podrán obtener los valores de tensión de salida en un rango de 0/10V.

Además, en el DAQ también se trabajará con la máxima frecuencia del Timer1 (31.37 kHz), por lo que, además de compartir el mismo diseño del circuito que en caso del acondicionamiento del sensor, el dimensionado de los valores de los componentes también serán los mismos.

Al igual que sucedía en el circuito de acondicionamiento de la salida del codificador, los circuitos de adaptación de la señal de entrada y de salida del DAQ se montarán sobre una placa perforada.

Además de los circuitos de acondicionamiento de las señales de entrada y salida, a la hora de diseñar la DAQ, tendrá mucha importancia el código introducido al Arduino. Este tendrá que ser capaz de realizar las siguientes operaciones:

- Leer el valor de la entrada analógica, convertirlo a un valor digital y enviar este valor cuando sea solicitado por el ordenador.
- Por otro lado, debe ser capaz de recibir un dato desde el PC, y generar una señal PWM proporcional al valor recibido.

Como ya se comentó en apartados anteriores, el Arduino Uno se emplea como DAQ en las plantas de nivel del Laboratorio de Optimización y Control de la escuela por lo que se empleará el mismo código que se implementa en los DAQ's de estas plantas.

Este código, emplea la comunicación por puerto serie para enviar y recibir datos entre el ordenador y el propio Arduino, y es capaz de trabajar con hasta dos señales de entrada y dos señales de salida (canal 0 y canal 1).

Para la comunicación serie, en el código (Apartado 12.6.1.2), se emplean diferentes funciones que se recogen y explican brevemente en el apartado 12.5.

La estructura del programa se divide en dos partes: una para la obtención de los valores de entrada y otra para la generación de la señal PWM con el valor del ciclo de trabajo recibido.

## 8.8. Diseño de la caja de protección

Como ya se adelantó en el apartado 7.6, el diseño de la caja se realizará en policarbonato y cubrirá los elementos móviles y una pequeña parte del frontal del motor.

La selección del policarbonato conlleva tener que realizar un diseño lo más simplificado posible, ya que su manipulación no es tan fácil como la de otros materiales como el metacrilato. De esta forma, se buscará un diseño que se pueda fabricar a partir de una plancha (forma comercial en la que se vende este material).

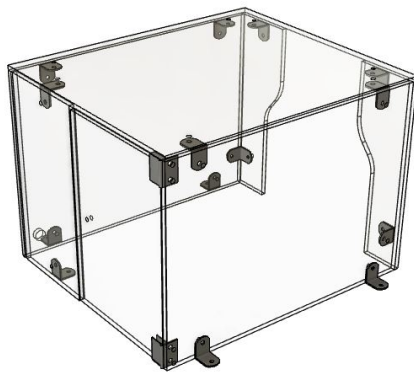
Además, otro factor a tener en cuenta es que el policarbonato no se puede pegar con cualquier tipo de componente adhesivo, ya que muchos de ellos pueden no fijarse al mismo o hasta quemarlos y degradarlos (como es el caso del Loctite). Por este motivo, y además para darle mayor robustez a la caja, las uniones de las diferentes partes que componen el diseño se realizarán mediante fijación por tornillos y el uso de escuadras (Figura 8.22).



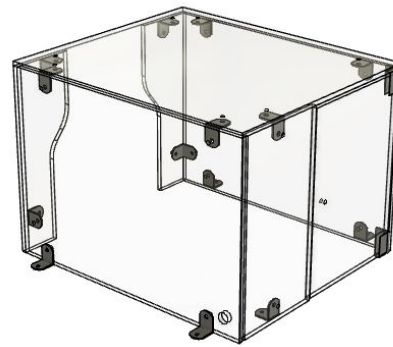
**Figura 8.22** – Escuadras

Por otra parte, se debe incluir en el diseño una puerta con la que acceder al interior de las cargas para que estas puedan ser reemplazadas.

El diseño realizado se puede observar en la Figura 8.23.

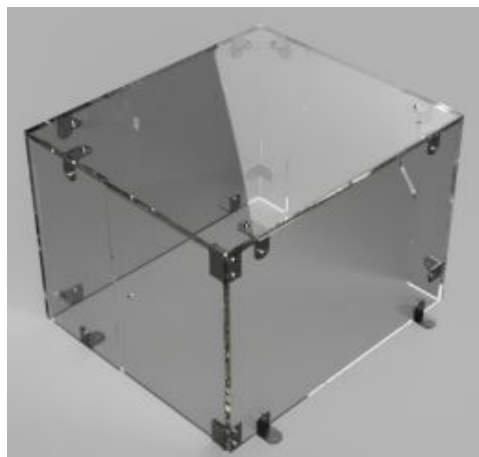


(a) Vista 1



(b) Vista 2

**Figura 8.23** – Diseño de la caja de protección



**Figura 8.24** – Renderizado del diseño de la caja de protección

El diseño se realiza para la fabricación del mismo a partir de una plancha de policarbonato de 5mm de espesor.

Como se puede observar, Figuras 8.24 y 8.23, el diseño dispone en su parte frontal de una puerta por la que acceder al interior de la misma. Para su correcta funcionalidad, se emplearán bisagras con fijación de 90°, que incorporan un pequeño seguro para mantenerlas en la posición de cierre (90°).

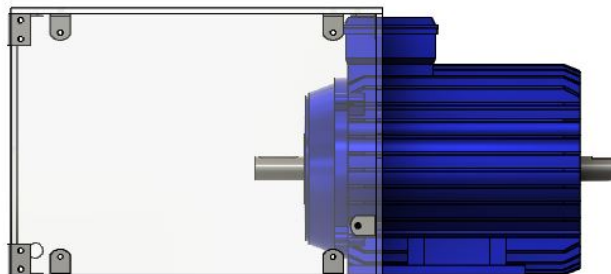


**Figura 8.25** – Bisagras con fijación [56]

Además, para que el acceso al interior de la caja se realice de la forma más segura posible, se colocará un final de carrera, que se pegará, en este caso con silicona caliente, a la parte interna de la tapa (cercana a la puerta), y que servirá para controlar el estado de la propia puerta. De esta forma, cuando ésta se abra el final de carrera se desactivará, produciendo el paro del motor. En caso contrario, es decir, con la puerta cerrada, el final de carrera se mantendrá activado, dejando que el sistema funcione.

Destacar que la puerta se diseña con las medidas necesarias para poder introducir tanto la mano como los discos de carga.

Otro factor a tener en cuenta en el diseño es la parte trasera del mismo, ya que dispone de una abertura, con la forma y dimensiones del motor, para albergar en su interior la parte frontal de éste.



**Figura 8.26** – Posición del motor en la caja

Por otro lado, destacar que el diseño no incorpora parte inferior ya que está pensado para fijarse, por medio de tornillos, al tablero base del proyecto, con lo que la parte inferior de proyección no es necesario protegerla ya que quedaría protegida por el propio tablero.

El despiece de la caja de protección se puede observar en el plano 26 del presente proyecto.

## 8.9. Selección del material eléctrico auxiliar

Además de los dispositivos eléctricos y electrónicos seleccionados en apartados anteriores, también será necesario, para un correcto funcionamiento del banco de pruebas, integrar los siguientes sistemas.

### 8.9.1. Sistema de marcha/paro

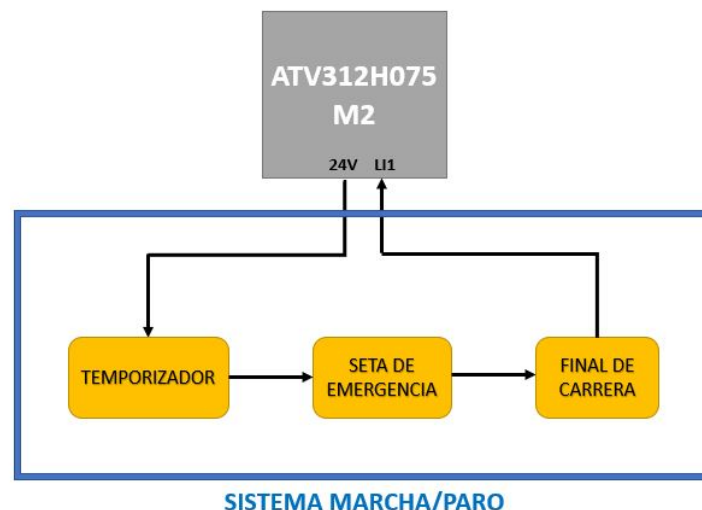
Como ya se comentó en el apartado 8.3 el variador de frecuencia tiene una entrada digital con la que se controla la función de marcha y paro del motor.

En este caso, y tomando como ejemplo el esquema eléctrico de las plantas de nivel del Laboratorio de Optimización y Control, se empleará esta entrada para gestionar los diferentes dispositivos de seguridad, como por ejemplo la seta de emergencia.

Bien es cierto que, los dispositivos de seguridad, es decir, tanto la seta de emergencia como el final de carrera, deberían de cortar la alimentación del motor una vez se activan. No obstante, debido al propio sistema del variador de frecuencia, interrumpir la alimentación del motor complicaría el diseño del banco de pruebas, ya que para reiniciarlo sería necesario desconectar el sistema de la alimentación y volverlo a activar, por lo que, con el objetivo de simplificar el diseño, se utilizará la entrada de control marcha/paro.

Una característica a destacar de esta entrada del variador es que funciona a 24V y debe activarse un cierto tiempo después de dar tensión al variador.

El sistema de control marcha/paro está compuesto por los siguientes dispositivos:



**Figura 8.27** – Sistema de control Marcha/Paro

Como se puede observar (Figura 8.27), todos los dispositivos de este sistema se conectarán en serie entre la salida de 24V y la entrada de control LI1 del variador.

#### ■ Temporizador con retardo a la conexión.

A consecuencia de que la entrada de control debe ser activada con un cierto retardo respecto a la propia alimentación del variador, y con el objetivo de automatizar el proceso de puesta en marcha del variador, se utilizará un módulo de temporización con retardo a la conexión.



**Figura 8.28** – Módulo temporizador [49]

El dispositivo, una vez recibe corriente por su entrada (12 V DC), espera un tiempo determinado, entre 0 y 10 segundos (regulado por el potenciómetro que integra), para activar el relé de la salida, con el que es capaz de activar/desactivar tensiones de hasta 250V AC. Para realizar la temporización, este módulo emplea un circuito electrónico basado en el integrado 555 y en el proceso de carga de un condensador eléctrico. También es importante destacar que, el relé de salida del que dispone el módulo, está dispuesto de un contacto NC y otro NA.

Para el presente trabajo se utilizará el contacto NA y se regulará de forma empírica el potenciómetro para obtener un tiempo de retardo ajustado a las necesidades del variador. De esta manera, una vez que se alimente todo el sistema, el módulo recibirá tensión en la entrada y comenzará con la temporización. Pasado este tiempo, se activará el relé, cerrando el contacto de 24V de suministro del variador por medio del contacto NA.

Bien es cierto que este circuito podría ser diseñado, no obstante, debido al bajo precio de estos dispositivos y al propio carácter modular del sistema, esta *shield* se ajusta perfectamente al proyecto.

#### ■ Seta de emergencia.

Otro de los elementos que se debe incluir en el sistema para cumplir con los requerimientos del mismo, Apartado 6, es una seta de emergencia con la que parar el motor en cualquier momento.



**Figura 8.29** – Seta de emergencia [50]

La seta de emergencia seleccionada cuenta con dos contactos (1 NA + 1 NC) y con un poder de corte de hasta 660 V 10A CA. Además, se trata de una seta de emergencia de activación fija, que una vez accionada manualmente mantiene su estado. Para desacti-

varla es necesario girar el cabezal en el sentido indicado por las flechas situadas en el mismo dispositivo.

Para el presente proyecto sólo se empleará el contacto NC, de tal forma que, al ser accionada, corte la alimentación de la señal de activación del variador, parando de esta forma el sistema.

#### ■ Final de carrera.

Como ya se comentó en el apartado anterior, el diseño de la caja de protección incorpora un final de carrera con el que parar el motor cuando se detecte la apertura de la puerta de acceso a las cargas.



**Figura 8.30** – Final de carrera [51]

El modelo de final de carrera seleccionado dispone de dos contactos (1 NA + 1 NC) con los que es capaz de cortar tensiones de hasta 250V/3A AC. Además, dispone de una palanca larga como accionamiento y conectores tipo faston.

Para el presente proyecto, y debido al propio diseño de la caja de protección, se utilizará únicamente el contacto NA, de tal forma que, al abrirse la puerta, se desactive el final de carrera cortando el paso de corriente y desactivando la entrada LI1 del variador.

### 8.9.2. Fuente de alimentación DC

Como se pudo ir viendo en apartados anteriores, el sistema diseñado incorpora diferentes dispositivos que trabajan con tensiones continuas, por lo que será imprescindible dotar al banco de pruebas de una fuente de alimentación DC.

Esta fuente tendrá que dar alimentación a:

- Microcontroladores Arduino para el acondicionamiento de la señal de salida del sensor magnético y para la DAQ.
- Módulo temporizador.
- A.O. LM358 empleados en los circuitos de adaptación de señales.

Analizando el consumo de todos los dispositivos eléctricos y electrónicos que consumen corriente DC se obtiene que el consumo total del sistema DC es inferior a 1 A. Conociendo este valor y sabiendo que la tensión de trabajo es de 12 V se procede a seleccionar la fuente de alimentación.





**Figura 8.31** – Fuente de alimentación seleccionada [45]

Las características eléctricas de la fuente de alimentación seleccionada son:

Características fuente de alimentación	
Tipo de tensión de entrada	AC
Tensión de entrada	90-264V AC 50Hz
Tipo de tensión de salida	DC
Tensión de salida	12 V
Potencia	35W
Corriente máxima	2,9A
Dimensiones	85x60x36mm

**Tabla 8.4** – Características fuente de alimentación seleccionada

Como se puede observar en la Tabla 8.5, la fuente de alimentación es capaz de suministrar hasta 2,9 A, sin embargo con 1 A sería suficiente para el banco de pruebas diseñado. Este desfase de corrientes se debe a que de esta forma la fuente de alimentación trabajará con un margen sobre su límite máximo de potencia, evitando un calentamiento excesivo de la misma. Por otro lado, este margen de corrientes facilitará la conexión de nuevos dispositivos con un consumo mayor de corriente en futuras modificaciones del sistema.

### 8.9.3. Interruptor magnetotérmico

Otro de los dispositivos que se incorporará al sistema será un magnetotérmico que cumplirá dos funciones:

- Será el interruptor general del sistema con el que dar alimentación a todo el proyecto.
- Protección de los componentes eléctricos frente a sobreintensidades y cortocircuitos.

Además, con el uso de este dispositivo se cumplirá con los requisitos de alimentación del proyecto (Apartado 6.5), de tal forma que se puedan alimentar tanto el variador como la fuente de alimentación DC desde una única toma de corriente.

A la hora de seleccionar el magnetotérmico es muy importante tener en cuenta la corriente máxima de consumo del sistema y la corriente de cortocircuito.

Analizados todos los dispositivos de consumo principales, variador y fuente de alimentación DC, se obtiene una intensidad nominal para todo el sistema ligeramente superior a 9 A

(Apartado 11.2). Por otro lado, consultando las hojas de características del variador y de la fuente DC se obtiene que la mayor corriente de cortocircuito es de 1 kA (variador).



**Figura 8.32** – Magnetotérmico 10 A [52]

Conociendo estos valores se seleccionó un magnetotérmico de 10 A, con un poder de corte de 6 kA y conexión polo+neutro.

Como se puede observar la intensidad nominal del magnetotérmico es superior a la de consumo del circuito, ya que se tiene en cuenta un pequeño margen de seguridad y además, el valor normalizado para una corriente de 9A es 10A. Por otro lado, el poder de corte es muy superior a la corriente de cortocircuito del sistema lo que producirá un correcto funcionamiento del dispositivo.

## 8.10. Sistemas de protección de los dispositivos eléctricos y electrónicos empleados

Una vez seleccionados todos los dispositivos eléctricos y electrónicos que van a formar parte del banco de pruebas, se procede a diseñar unas cajas y elementos de protección, con los que poder proteger a los dispositivos de agentes externos. Por otro lado, estas cajas servirán para poder organizar y diferenciar espacialmente las principales etapas del proyecto siguiendo la disposición seleccionada (Figura 7.30). Además, estas cajas de protección aportarán al sistema un carácter modular con el que cumplir los requisitos de diseño.

De esta manera será necesario diseñar 2 cajas principales:

- Caja de protección del sistema de adquisición de datos (DAQ).
- Caja de protección para la fuente de alimentación DC, circuito de control marcha/paro y adaptación de la señal de salida del sensor.

Por otro lado, y con el objetivo de proteger las conexiones eléctricas de los sistemas que trabajan con corriente alterna, se diseñará también una carcasa de conexiones para el variador y otra para el magnetotérmico, con las que se protegerá al usuario del posible contacto con

los terminales AC. Para el diseño tanto de las cajas, como de las carcasas de protección, se tendrán en cuenta los siguientes puntos:

- Las conexiones de potencia entre las cajas serán fijas y tendrán que protegerse con prensaestopas.



**Figura 8.33** – Prensaestopa [55]

- Como consecuencia del carácter educativo del presente proyecto, para las conexiones de control y alimentación DC se diseñarán para conectores banana de 4 mm con los que facilitar la realización de tareas de conexionado entre módulos.



(a) Macho [54]



(b) Hembra [53]

**Figura 8.34** – Conectores banana 4 mm

- La conexión del sensor, al igual que en el soporte, se realizará por medio de un conector macho de 4 pines (M4).



**Figura 8.35** – Conector 4 pines macho [47]

- Tanto las cajas como las carcasas de protección se diseñarán para ser fabricadas en plástico por medio de impresión 3D.
- Las carcasas de protección de contactos se diseñarán en color rojo, mientras que las cajas de protección se fabricarán en color negro. Este cambio de color tiene como objetivo indicar al usuario las conexiones por las que transita una mayor corriente AC.

#### **8.10.1. Caja de protección del sistema de adquisición de datos (DAQ)**

Para el diseño de la caja de protección de la tarjeta de adquisición de datos, se toma como ejemplo el diseño de las fabricadas para las plantas de nivel del Laboratorio de Optimización y Control de la escuela.

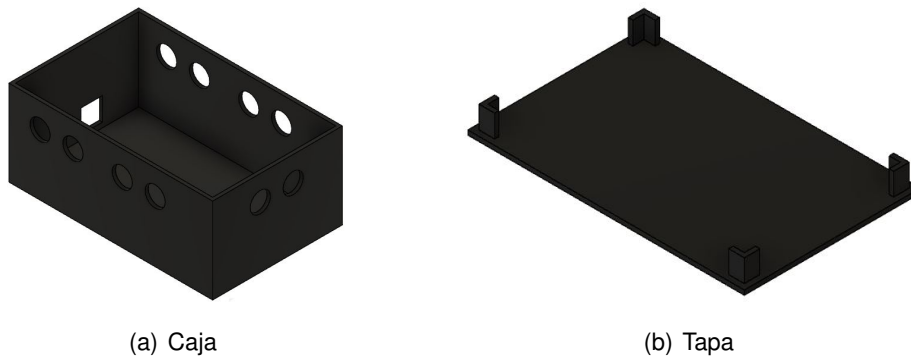
La caja tendrá que albergar tanto el microcontrolador Arduino como el propio circuito de acondicionamiento de las señales de entrada y salida.



**Figura 8.36** – Disposición de los dispositivos DAQ en la caja

A la hora de modelar la caja también se tendrá en cuenta que el algoritmo implementado en el sistema DAQ, es capaz de trabajar con dos canales de entrada y de salida.

El diseño realizado es el siguiente:



**Figura 8.37** – Diseño caja protectora DAQ

Como se puede observar, Figura 8.37(a), la caja dispone de 10 agujeros circulares donde situar los conectores banana hembras (2 para alimentación y 8 para para los cuatro canales de entrada y salida de señales). Además dispone de un pequeño agujero para la conexión del Arduino al PC por medio del conector USB del puerto serie.

Bien es cierto que para el presente trabajo sólo se utilizarán 2 canales, uno para la señal de salida y otro para la entrada, pero con este diseño se podrán implementar posibles modificaciones en el sistema sin tener que rediseñar la propia caja.

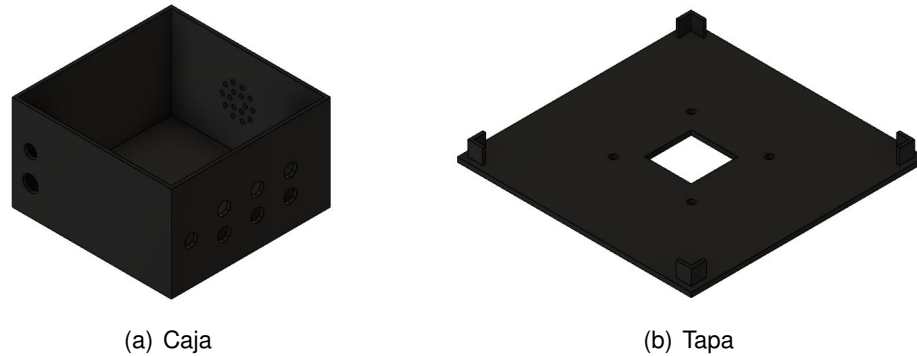
### 8.10.2. Caja de protección general (alimentación DC + control + acondicionamiento codificador)

Esta caja será la principal del proyecto y tendrá que albergar los siguientes dispositivos:

- Fuente de alimentación DC.
- Circuito de acondicionamiento de la salida del codificador (Arduino + circuito de filtrado y amplificación).

- Temporizador para la activación del variador.
- Seta de emergencia.

El diseño realizado para la caja general es el siguiente:



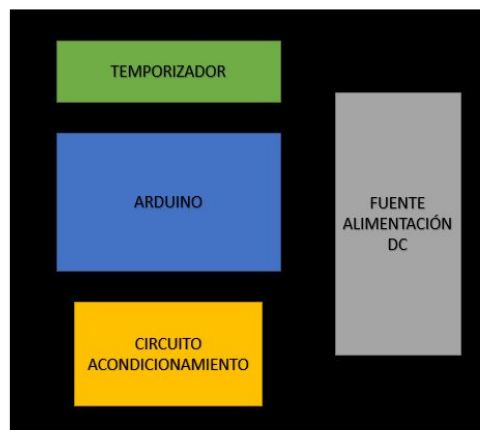
**Figura 8.38** – Diseño caja general

En cuanto a la propia caja, ésta está diseñada para incorporar los siguientes conectores:

- 6 conectores hembra banana.
  - 2 para la salida de tensión de 12 V para alimentar el circuito del DAQ.
  - 2 para la señal de control del sistema marcha/paro.
  - 2 para la señal de salida 0/10V del sensor de velocidad.
- 1 conector macho de 4 pines para conectar el codificador.
- 1 prensaestopa PG7 para la conexión del final de carrera de la caja de seguridad.
- 1 prensaestopa PG9 para la conexión de alimentación AC de la fuente DC.

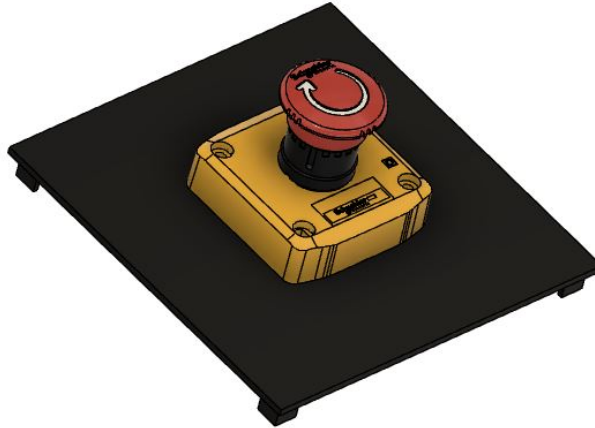
Además, la caja también incluye unos pequeños agujeros de ventilación para evitar el calentamiento de los dispositivos.

La disposición de los elementos en la caja sigue el siguiente esquema:



**Figura 8.39** – Disposición de los dispositivos en la caja general

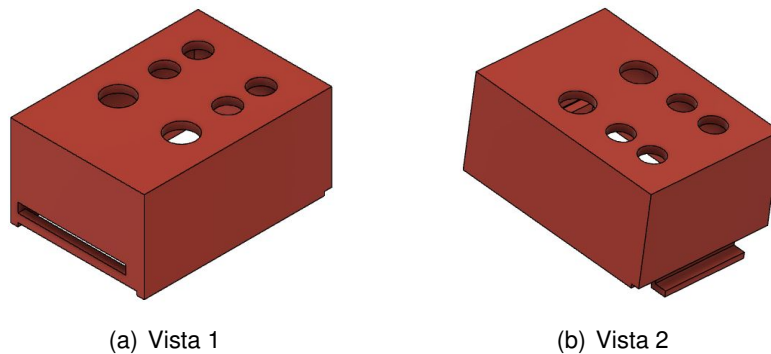
Por otra parte, en la tapa se colocará la seta de emergencia. Para aumentar la visibilidad de la misma en el proyecto se utilizará la base amarilla de la que dispone. Para ello, la tapa está equipada con 4 agujeros pasantes en los que se situarán los tornillos de fijación (métrica 4), y un agujero cuadrado central por donde pasar los contactos NC y NA del dispositivo.



**Figura 8.40** – Disposición de la seta de emergencia sobre la tapa

### 8.10.3. Carcasa de protección de los contactos del variador de frecuencia

Uno de los problemas del variador de frecuencia seleccionado es que sus contactos eléctricos de potencia y control están bastante expuestos. Tanto para proteger a estos contactos como al usuario y, además, para facilitar el propio conexionado, se diseña la siguiente carcasa.



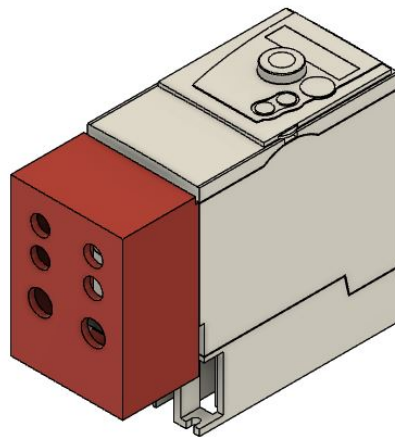
**Figura 8.41** – Diseño de la carcasa del variador de frecuencia

Esta carcasa dispone de 6 orificios de conexión:

- 4 conectores hembra tipo banana.
  - 2 para la conexión 0/10V de regulación de la señal de salida del variador (AI1 y COM).
  - 2 conectores para el circuito de control marcha/paro (24V y LI1).
- 2 prensaestopas PG9.

- 1 para la alimentación del variador (230V AC).
- 1 para la tensión de alimentación del motor (tensión trifásica 230 V de salida del variador).

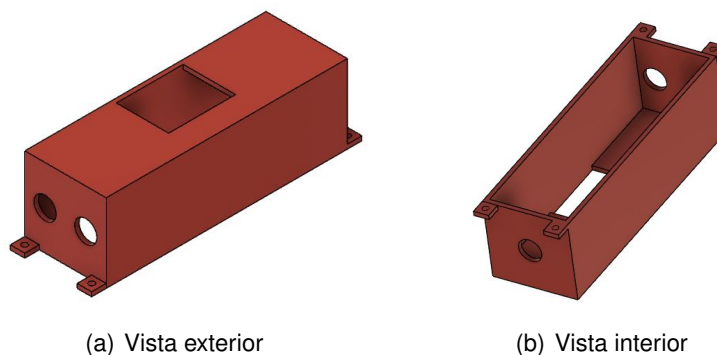
Esta carcasa se acoplará al dispositivo por medio de unos tornillos y orificios que presenta el variador en la parte de abajo del grupo de contactos (dispuestos para acoplar filtros CEM). Para ello, se dispone de una pequeña ranura pasante en la parte inferior del diseño. También se incluye un pequeño saliente en la parte superior del protector que quedará preso al cerrar la tapa del variador de frecuencia.



**Figura 8.42** – Disposición de la carcasa del variador de frecuencia

#### 8.10.4. Carcasa de protección del magnetotérmico

Por último se diseñará una carcasa de protección para los contactos del interruptor magnetotérmico. El diseño realizado es el expuesto en la Figura 8.43.



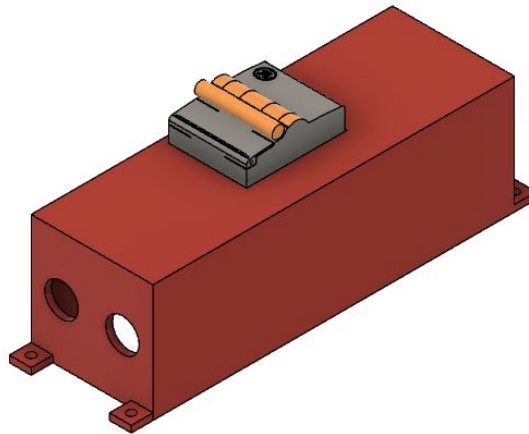
**Figura 8.43** – Diseño de la carcasa del interruptor magnetotérmico

Esta carcasa incluye 3 agujeros para acoplar 3 prensaestopas PG9:

- En la parte superior se dispondrá la línea de alimentación general del proyecto (tensión de entrada del magnetotérmico).

- En la parte inferior se situarán los dos restantes prensaestopas. Uno de ellos se conectará a la alimentación del variador de frecuencia, mientras que el otro se conectará a la fuente de alimentación 12V DC albergada en la caja general.

El diseño, también dispone de un agujero cuadrado en el que se situará el interruptor del dispositivo, y además incluye 4 salientes planos para la fijación de la carcasa al tablero de base del proyecto.



**Figura 8.44** – Disposición de la carcasa del interruptor magnetotérmico

Como bien se puede apreciar en la figura 8.44, el interruptor está desplazado hacia uno de los laterales. Esto se debe a que la carcasa albergará la conexión tierra del sistema, la cual no se conecta al magnetotérmico, sino que se empleará una ficha de conexión, por lo que es necesario dejar un pequeño espacio para situarla en su interior.

## 8.11. Disposición espacial de los diferentes elementos que intervienen en el sistema

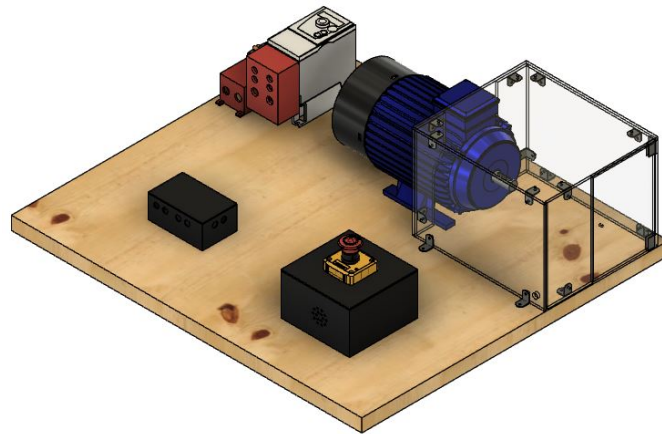
El último factor a tener en cuenta en cuanto al diseño del proyecto es la distribución espacial de los diferentes elementos que actúan en el sistema.

Como ya se adelantó en el apartado 7.9, la disposición espacial seleccionada corresponde con la expuesta en la figura 7.29, ya que presenta un cableado más ordenado entre los diferentes componentes.

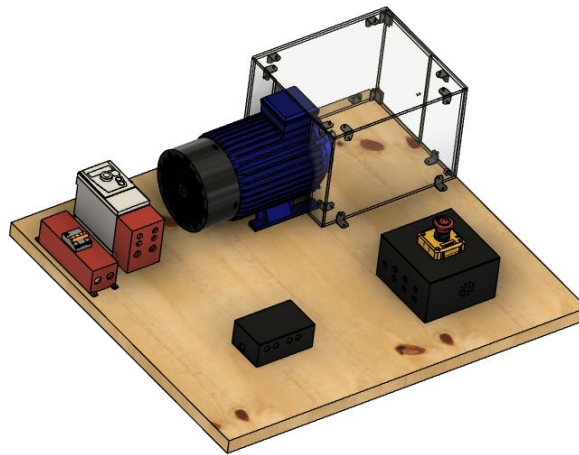
Además, como elemento base, se utilizará un tablón de madera con dimensiones 80x70 cm y con un espesor de 3 cm, en el que se fijarán/colocarán los diferentes dispositivos.

A modo de resumen, el diseño final del sistema se puede observar en las Figuras 8.45 y 8.46.





**Figura 8.45** – Diseño completo del sistema (Vista 1)



**Figura 8.46** – Diseño completo del sistema (Vista 2)

Tanto la caja de protección, como el variador, el interruptor magnetotérmico y el propio motor, se fijarán al tablero empleando tornillos. En cambio, la caja general y la caja DAQ no se fijarán para que el usuario pueda colocarlas sobre el tablero en la posición que más se ajuste a sus necesidades.

## 8.12. Fabricación de las piezas 3D

En el sistema del banco de pruebas se puede observar como hay una gran cantidad de piezas diseñadas para su fabricación 3D. Todas estas piezas, excepto el soporte de las cargas y las propias cargas, se fabricarán empleando la tecnología de impresión 3D por medio del uso de una impresora 3D.

Para el presente proyecto se utilizará el modelo de impresora 3D Anet A6 del fabricante Anet. Este modelo es muy conocido en el ámbito *maker* ya que presenta unos buenos resultados y un bajo coste. Además, su área de impresión (22 x 22 x 24 cm) tiene el tamaño suficiente para poder imprimir todas las piezas diseñadas para el presente proyecto.

Por otro lado, se empleará como material de fabricación el Ácido Poliláctico (PLA), puesto que, este tipo de polímero, presenta un coste reducido y una gran facilidad de extrusión.

En cuanto al diseño de las piezas impresas con esta tecnología se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Con la impresión 3D, y sobretodo con el uso, tanto de equipamiento de bajo coste como de materiales plásticos, resulta casi imposible llevar a cabo un agujero roscado con cierta garantía de funcionamiento. Como alternativa a este problema se suelen diseñar pequeños agujeros en los que insertar tuercas de la métrica necesaria para obtener el roscado precisado.
- Dentro del diseño de las diferentes piezas, será necesario tener en cuenta las inexactitudes de medidas que se generan. Estos errores son de importante consideración en piezas destinadas a encajar con diferentes conectores o dispositivos. Estas desviaciones pueden ser producidas por diversos motivos entre los que destacan:
  - Inexactitudes producidas por el proceso de retracción del material plástico extruído.
  - Inexactitudes propias de la impresora 3D. Este tipo de inexactitudes dependen del modelo de impresora y resulta sencillo corregirlos en gran parte.
  - Inexactitudes producidas por la velocidad de impresión (velocidades muy altas provocan mayores desviaciones).

Como consecuencia de estos errores es necesario considerar un pequeño margen (entorno a 0,2-0,3 mm) en las diferentes medidas del diseño CAD.

Los parámetros de impresión detallados para cada pieza se recogen en el apartado 12.4.

### 8.13. Programación software del algoritmo de control para el correcto funcionamiento del banco de pruebas

Una vez diseñado el banco de pruebas, será imprescindible realizar la programación del algoritmo de control que se encargará de regular el sistema. Como bien se recogió en el apartado 7.10, este algoritmo se realizará en Matlab puesto que es el programa empleado en las asignaturas de control de la universidad y además se dispone de las funciones que comunican el programa con la DAQ (Arduino).

Estas funciones de comunicación entre Matlab y Arduino son las siguientes:

- **DAQ\_Start**: función empleada para iniciar la comunicación por el puerto serie. Su código se puede consultar en el apartado 12.6.2.1.
- **DAQ\_Stop**: función para parar los actuadores y para cerrar el puerto serie de comunicación. Su código se puede ver en el apartado 12.6.2.2.
- **DAQ\_Write**: función para escribir por el puerto serie los valores de la señal de salida. Estos valores serán porcentuales, es decir, entre 0 y 100. Esta función es capaz de

trabajar con 2 canales de salida, *canal\_0* y *canal\_1*, no obstante para este proyecto sólo se empleará el *canal\_0*.

Para el banco de pruebas, la función *DAQ\_Write* será con la que se regule la señal PWM de salida del Arduino DAQ. Esta señal se acondiciona con el circuito de acondicionamiento de la señal de salida del DAQ y se envía a la entrada de control de velocidad del variador.

El código de esta función se presenta en el apartado 12.6.2.4.

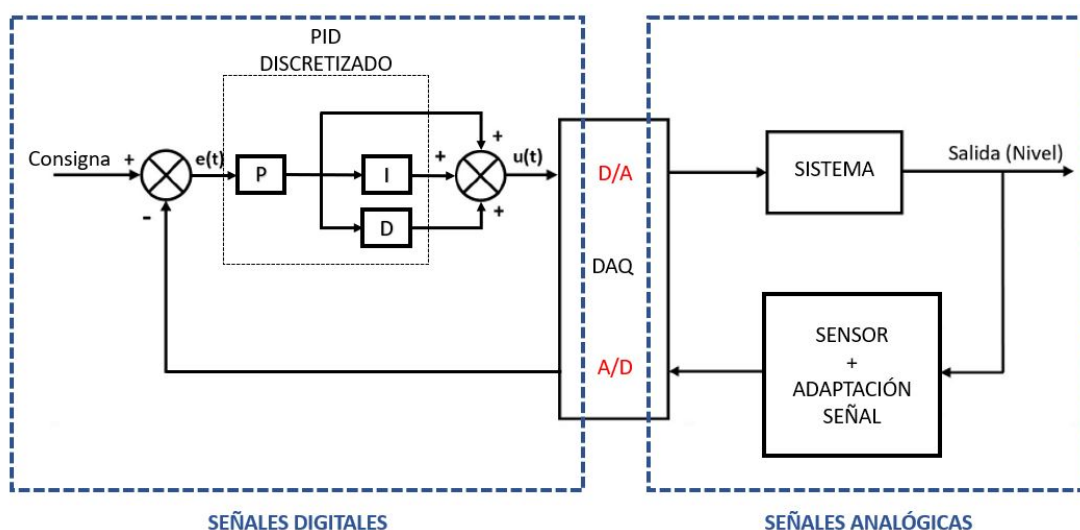
- **DAQ\_Read**: función empleada para leer la señal de realimentación del sistema. En este caso sería la velocidad del motor. Su código se puede observar en el apartado 12.6.2.3.

Por otro lado, como se recoge en los antecedentes del proyecto (Apartado 3), el controlador empleado para regular y controlar la velocidad del motor, será un Controlador tipo PID. Las características generales de este tipo de controladores se recogen de forma abreviada en el apartado 3.4.

Por otro lado, la expresión matemática de estos reguladores corresponde con la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (8.1)$$

No obstante esta ecuación se corresponde con una expresión analógica, en cambio, para el proyecto, y como consecuencia de emplear un algoritmo de control (PC), será necesario utilizar una expresión discretizada de este controlador, en donde el control se efectúa de forma discontinua, teniendo en cuenta los valores obtenidos en ciertos instantes de tiempo determinados por el *Tiempo de Muestreo* del sistema (tiempo entre cada muestra de valores obtenida). Por tanto, resulta imprescindible llevar a cabo una discretización de la expresión del controlador PID.



**Figura 8.47** – Diagrama de bloques del sistema de control del banco de pruebas

Para la discretización del controlador PID se empleará el método de Tustin (transformada

bilineal) con la aproximación de posición, con el objetivo de obtener las ecuaciones en diferencias.

$$C(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s} \right) \quad (8.2)$$

Siendo N filtro paso bajo para la eliminación del ruido.

Partiendo de la ecuación del PID analógico, Ecuación 8.2 y aplicando el método de Tustin se pueden obtener los siguientes coeficientes:

$$C_1 = \frac{T_s}{2T_i} \quad (8.3)$$

$$C_2 = \frac{2Td}{\frac{2Td}{N} + T_s} \quad (8.4)$$

$$C_3 = \frac{\frac{2T_d}{N} - T_s}{\frac{2Td}{N} + T_s} \quad (8.5)$$

Siendo  $T_s$  el tiempo de muestreo,  $T_i$  la constante de integración,  $T_d$  constante de derivación y N coeficiente filtro paso bajo.

Teniendo en cuenta las expresiones de los coeficientes, se enuncian las ecuaciones discretizadas del controlador PID:

$$e[k] = r[k] - y[k] \quad (8.6)$$

$$i[k] = C_1 (e[k] + e[k - 1]) + i[k - 1] \quad (8.7)$$

$$d[k] = C_2 (e[k] - e[k - 1]) + C_3 d[k - 1] \quad (8.8)$$

$$u[k] = K (e[k] + i[k] + d[k]) \quad (8.9)$$

Siendo  $e[k]$  el error del sistema (parte proporcional),  $i[k]$  la parte integrativa,  $d[k]$  la componente derivativa y  $u[k]$  la señal de control generada.

Estas ecuaciones serán las que se emplearán en el algoritmo de control y se encargarán de calcular la señal de control. Por otro lado, también se puede destacar que estas ecuaciones, pueden ser modificadas, para obtener reguladores PI o P, simplemente eliminando la parte derivativa o la parte derivativa e integrativa de las mismas.

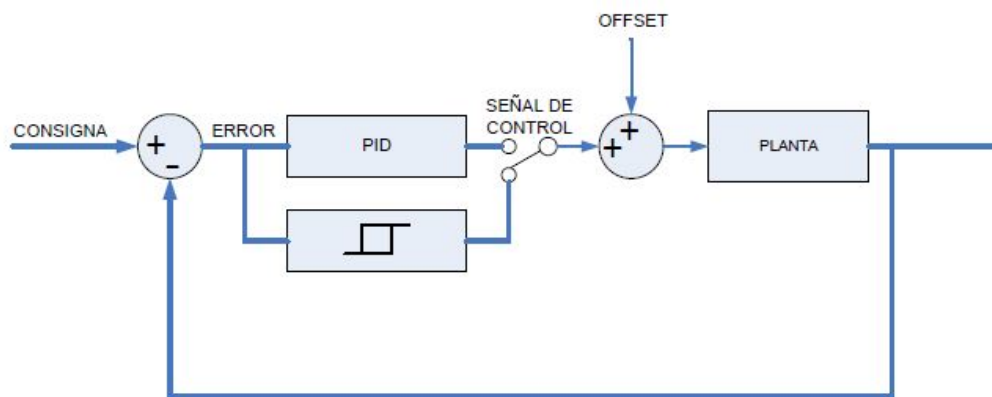
### 8.13.1. Obtención de las constantes de ajuste del PID

Teniendo en cuenta las expresiones de los coeficientes, Ecuaciones 8.3, 8.4 y 8.5, que se emplean en el algoritmo del PID, Ecuaciones 8.6, 8.7, 8.8 y 8.9, resulta fundamental obtener los valores apropiados de los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ . Para ello, se pueden emplear diferentes

métodos, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado. No obstante, para el presente proyecto se empleará el método *Relay-Feedback* junto con las expresiones de *Ziegler-Nichols* para lazo cerrado.

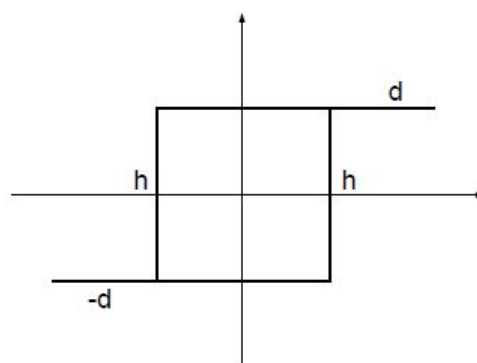
#### ■ Método *Relay-Feedback* [4]

El método *Relay-Feedback* fue desarrollado por Aström y Hägglud, para la obtención de los valores de la ganancia crítica  $K_c$  y del periodo de oscilación sostenida  $T_c$ , y se basa en llevar al sistema a un estado de oscilación por medio de la introducción de un relé en el sistema.



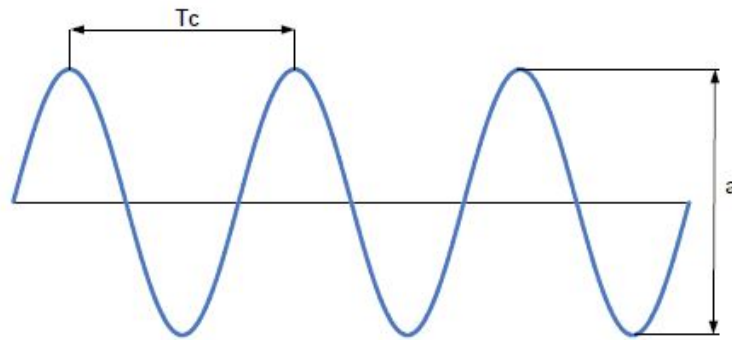
**Figura 8.48** – Diagrama de bloques del método Relay-Feedback [4]

El relé empleado para llevar al sistema a un estado oscilatorio corresponde con un relé con histéresis, Figura 8.49, con una amplitud  $d$  y un ancho de ventana  $h$  determinado por el usuario, y con los que se puedan alcanzar las citadas oscilaciones.



**Figura 8.49** – Histéresis del relé para la ejecución del método Relay-Feedback [4]

Ejecutando este método se obtendrá una gráfica con la representación de la señal oscilatoria, correspondiente a la salida del sistema, con la que se pueden obtener los parámetros del tiempo crítico  $T_c$ , correspondiente con el propio periodo de oscilación de la gráfica, y el parámetro  $a$ , correspondiente a la amplitud de la oscilación.



**Figura 8.50** – Gráfica obtenida en la salida del sistema con *Relay-Feedback* [4]

Una vez obtenidos los parámetros  $T_c$  y  $a$  se podrá calcular la ganancia crítica del sistema empleando la siguiente ecuación:

$$K_c = \frac{4d}{\pi\sqrt{a^2 - h^2}} \quad (8.10)$$

De esta manera, se obtienen los parámetros  $T_c$  y  $K_c$  necesarios para la aplicación de las fórmulas de *Ziegler-Nichols*, Ecuaciones 8.11, 8.12 y 8.13, con las que obtener las constantes  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ .

$$K_p = K_c \times 0,6 \quad (8.11)$$

$$T_i = T_c \times 0,5 \quad (8.12)$$

$$T_d = T_c \times 0,125 \quad (8.13)$$

El rango de aplicación de las fórmulas de *Ziegler-Nichols* es empírico para unos valores tal que:

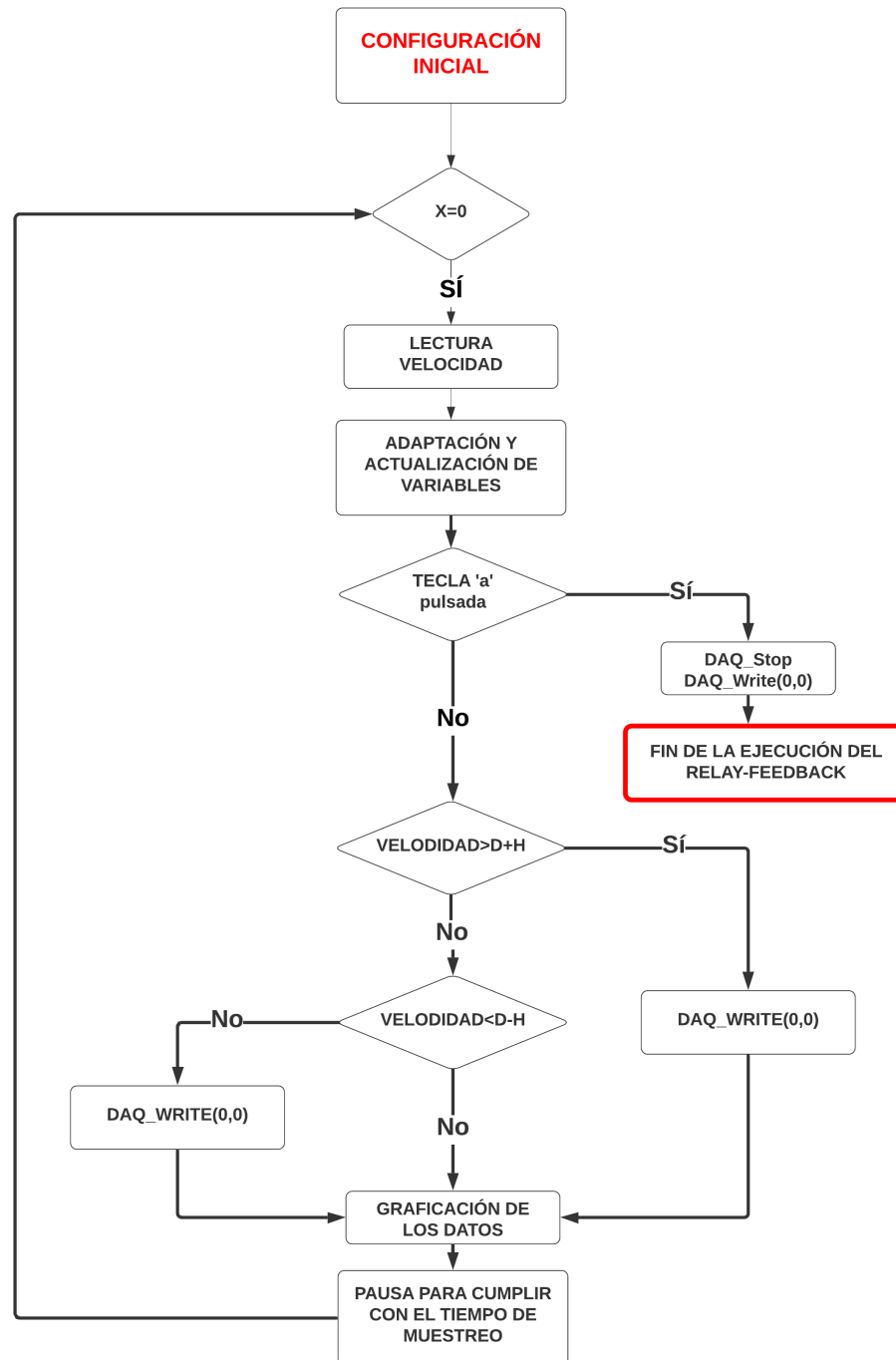
$$2 < k \cdot K_c < 20 \quad (8.14)$$

Con  $K_c$  ganancia crítica y  $k$  ganancia del sistema.

Para el presente proyecto ha sido necesario modificar los valores de los parámetros obtenidos por medio de las fórmulas de *Ziegler-Nichols* para suavizar la respuesta del sistema. Estas modificaciones se recogen en el apartado 11.3.

#### ■ Algoritmo para la ejecución del método *Relay-Feedback*

Para implementar este método se diseña un algoritmo en Matlab con el que poder obtener la oscilación del sistema.



**Figura 8.51** – Diagrama de bloques de la programación para la ejecución del método Relay-Feedback

Como se puede observar en el diagrama de la Figura 8.51, este algoritmo sigue la siguiente estructura:

1. Inicialización de la comunicación por puerto serie entre la DAQ del sistema y Matlab, empleando la función *DAQ\_Start* anteriormente comentada. También se sitúan las variables de trabajo a valores iniciales.
2. Ejecución del bucle de proceso principal. Dentro de este bucle se pueden diferenciar

las siguientes etapas:

- a) Lectura de la velocidad de la planta por medio del uso de la función *DAQ\_Read*.
- b) Actualización de los vectores de datos de tiempo y velocidad del sistema, que se emplearán para representar las gráficas.
- c) Obtención de la señal de control del sistema. Esta señal será del 100 % hasta que la velocidad del sistema no llegue a la velocidad máxima indicada (amplitud + consigna). Una vez que llegue a ese valor la señal de control pasará a ser 0 hasta que se alcanza la velocidad mínima (amplitud – consigna), punto en el que se obtendrá un valor del 100 %, repitiendo así el ciclo.
- d) Representación de los resultados obtenidos en una gráfica (Velocidad-Tiempo).
- e) Con el objetivo de que el código se ejecute con un tiempo determinado entre muestras (Tiempo de Muestreo), se ejecuta una pausa determinada por el propio tiempo de muestreo indicado por el usuario, al que se le resta el tiempo de ejecución del algoritmo. Para conocer el valor de este tiempo se usan las funciones *tíc*, con la que se inicia el temporizador y *toc* con el que se finaliza la temporización.

Para poder parar el sistema y mantener la gráfica abierta para obtener los valores de  $T_c$  y  $a$ , se facilita un paro del sistema empleando la pulsación de la tecla “a” del propio teclado del ordenador.

Por último, destacar que, como datos de entrada, para la correcta ejecución del algoritmo, será necesario introducir los valores del tiempo de muestreo, la amplitud (d) y el ancho de la ventana de histéresis (h).

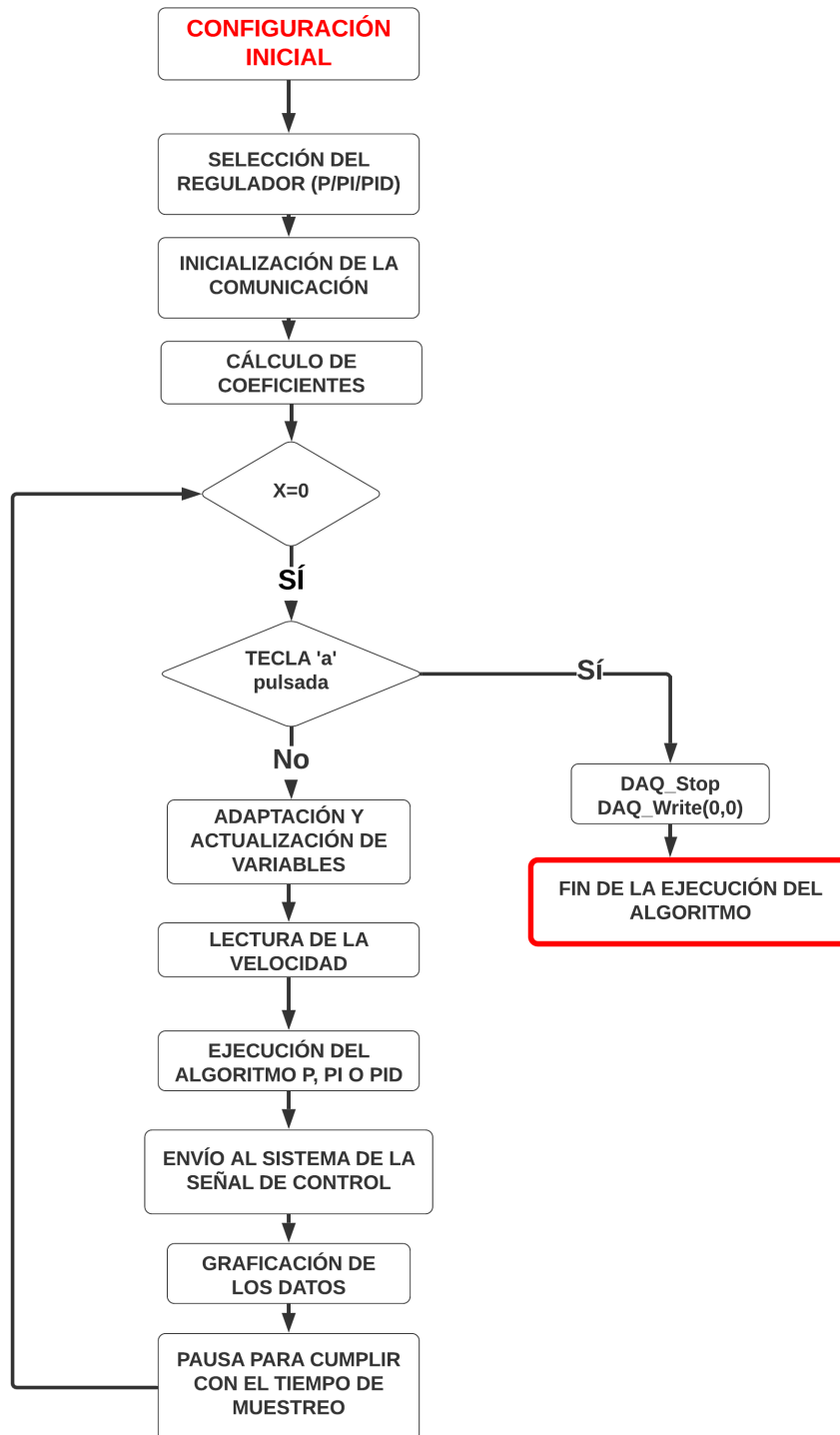
El código empleado para la ejecución del *Relay-Feedback* se presenta en el apartado 12.6.2.5.

Además, la ejecución de este algoritmo y la obtención de las constantes de ajuste del regulador se recogen en el apartado 11.3.

### 8.13.2. Algoritmo de control PID

Expuesto el algoritmo empleado para la obtención de los parámetros del controlador PID, se presenta el programa de control del sistema, basado en las ecuaciones discretizadas del PID (Ecuaciones 8.6, 8.7, 8.8 y 8.9).



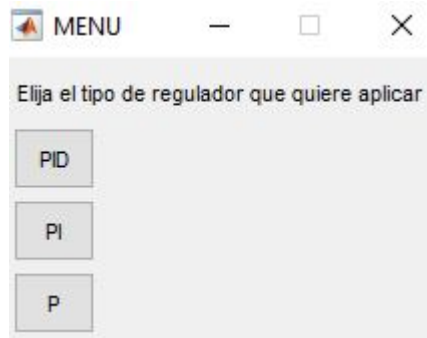


**Figura 8.52** – Diagrama de bloques de la programación para la ejecución del algoritmo de control PID

Analizando el esquema de la Figura 8.52, se puede comprobar como el algoritmo de control PID está compuesto por las siguientes etapas:

1. En primer lugar, se sitúan las variables de trabajo en valores iniciales.
2. Selección del regulador empleado, desplegando para ello una pequeña pantalla de opciones en la que se podrá seleccionar el tipo de regulador a implementar. Para este

proyecto se decide presentar las opciones P, PI y PID, con el objetivo de observar el comportamiento del sistema ante diferentes reguladores.



**Figura 8.53** – Ventana emergente para la selección del regulador

3. Inicialización de la comunicación DAQ (sistema) con Matlab, empleando la función *DAQ\_Start*.
4. Cálculo de los coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  presentes en el algoritmo discretizado del PID. Para ello, se utiliza la función *calculocoeficientes* que devuelve los valores de los coeficientes a partir de los parámetros  $T_i$ ,  $T_d$ ,  $T_s$  y  $N$ . El código de esta función se puede observar en el apartado 12.6.2.7.
5. Ejecución del bucle de control. Este bucle contiene los siguientes procesos:
  - a) Actualización de las variables de trabajo.
  - b) Lectura de la velocidad del sistema empleando la función *DAQ\_Read*.
  - c) Ejecución del algoritmo discretizado del PID.

Ya que se pueden ejecutar tanto un regulador P como un PI o PID, el algoritmo se adapta a cada una de estas opciones, eliminando el termino derivativo e integral o sólo el término derivativo.

Además, como este algoritmo trabaja con valores anteriores al instante actual, es necesario eliminar estos términos de las ecuaciones en el primer ciclo de trabajo para que no se produzcan errores de ejecución.
  - d) Envío al sistema de la señal de control calculada, por medio de la función *DAQ\_Write*.
  - e) Graficar los datos obtenidos. Para realizar este proceso se utiliza la función *graficar*, cuyo código se presenta en el apartado 12.6.2.6, con la que se representará en una única gráfica la velocidad del sistema (r.p.m.) en color negro, el valor absoluto del error (r.p.m.) en color rojo, el valor de consigna (r.p.m.) en color azul y la señal de control (% potencia enviada al motor) en color verde.
  - f) Al igual que sucede en el algoritmo diseñado para el proceso *Realy-Feedback*, al final del bucle se realiza una pausa con el objetivo de que el tiempo de muestreo entre las muestras se mantenga constante. Para ello se emplearán las funciones *tic* y *toc* anteriormente explicadas.

Como se puede observar el control realizado sobre el sistema se realizará con valores porcentuales de velocidad, puesto que las funciones de comunicación Matlab-Arduino trabajan con este tipo de datos, facilitando así, su implementación en el presente proyecto.

Para proceder a detener la ejecución del programa se podrá presionar la tecla “a”, siempre y cuando la ventana gráfica permanezca abierta.

Destacar que, como datos de entrada del algoritmo de control, será necesario introducir el valor de consigna, el tiempo de muestreo y los parámetros de ajuste ( $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  y  $N$ ).

El algoritmo diseñado se puede consultar en el apartado 12.6.2.8 del presente proyecto.

Por otra parte, y con el objetivo de ver el comportamiento del sistema ante cambios del *Set-point*, se diseña una pequeña modificación sobre el algoritmo de control anteriormente expuesto con el que se podrá introducir, como valor de consigna, un vector con diferentes velocidades. El algoritmo irá recorriendo este vector, hasta su última posición, momento en el que se detendrá la ejecución del programa y se cerrará la comunicación del puerto de comunicación.

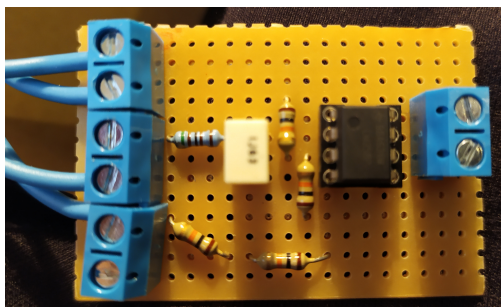
El código modificado se presenta en el apartado 12.6.2.9.

## 8.14. Montaje y puesta en marcha del sistema

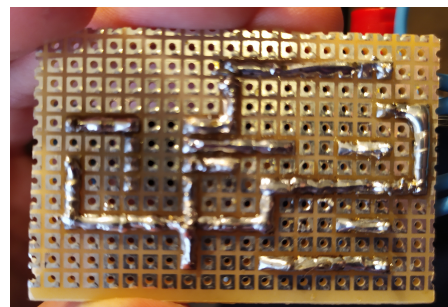
Con el objetivo de ordenar y estructurar el proceso de montaje y puesta en marcha del sistema se procede a seguir las siguientes etapas:

1. Fabricación de las piezas en 3D y de la caja de protección.
2. Fabricación de las placas con los diferentes componentes que intervienen en los circuitos de acondicionamiento de señales. Será necesario realizar 2 placas, una para la adaptación de las señales de entrada y salida de la DAQ y otra placa para la salida del acondicionamiento del sensor. Del mismo modo también se fabricará la placa de bornes de alimentación para los dispositivos de la caja general.

Como ya se comentó en apartados anteriores, estas placas se fabricarán, para el presente proyecto, utilizando una placa perforada. No obstante en la sección de planos de este documento, se pueden encontrar los esquemas para la fabricación de las mismas mediante la técnica de impresión de circuitos (ancho de pista de 0,4 mm).



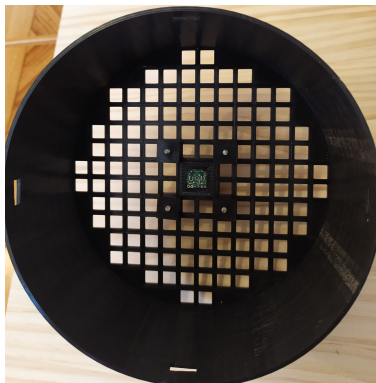
(a) Componentes



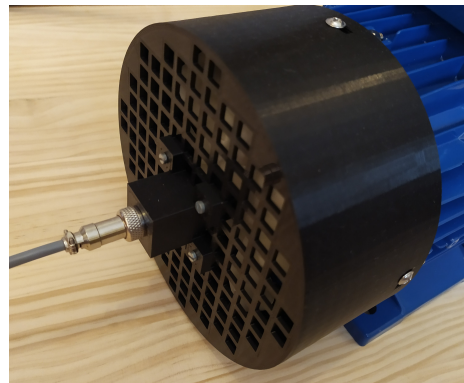
(b) Soldaduras

**Figura 8.54** – Placa del circuito de adaptación de señales de la DAQ

3. Cargar los códigos empleados tanto en el microcontrolador Arduino para el acondicionamiento de la señal del sensor de velocidad como del propio DAQ. Para ello se conecta cada microcontrolador con el Arduino y por medio del software Arduino IDE se procede a subirlos a la placa.
4. Montaje y conexionado de los diferentes dispositivos del sistema.
  - Soporte y conexión del codificador de velocidad.



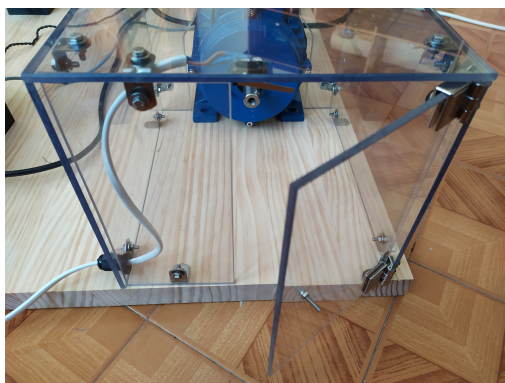
(a) Vista interior



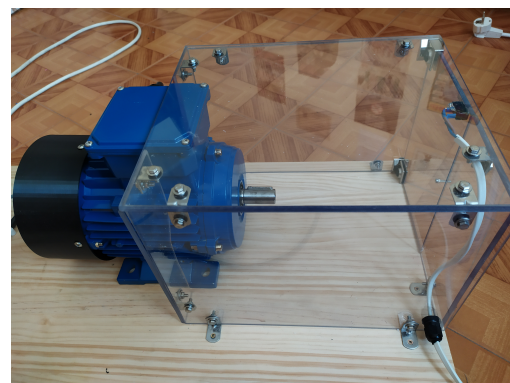
(b) Vista exterior

**Figura 8.55** – Soporte y conexión del codificador de velocidad

- Caja de protección.



(a) Plano detalle puerta

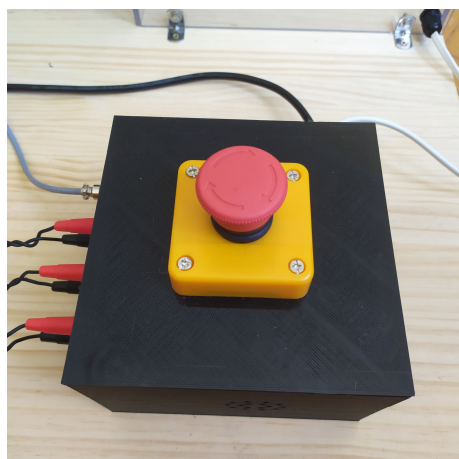


(b) Vista general

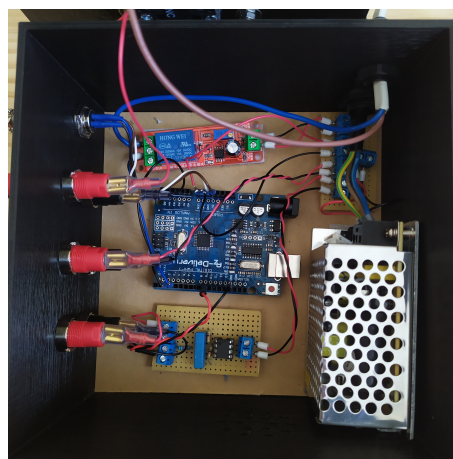
**Figura 8.56** – Montaje de la caja de protección

- Caja general del proyecto.





(a) Vista exterior



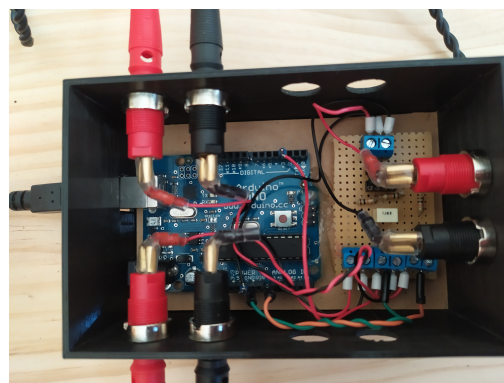
(b) Vista interior

**Figura 8.57** – Montaje de la caja general del sistema

- Sistema de adquisición de datos.



(a) Vista exterior



(b) Vista interior

**Figura 8.58** – Montaje de la caja DAQ del sistema

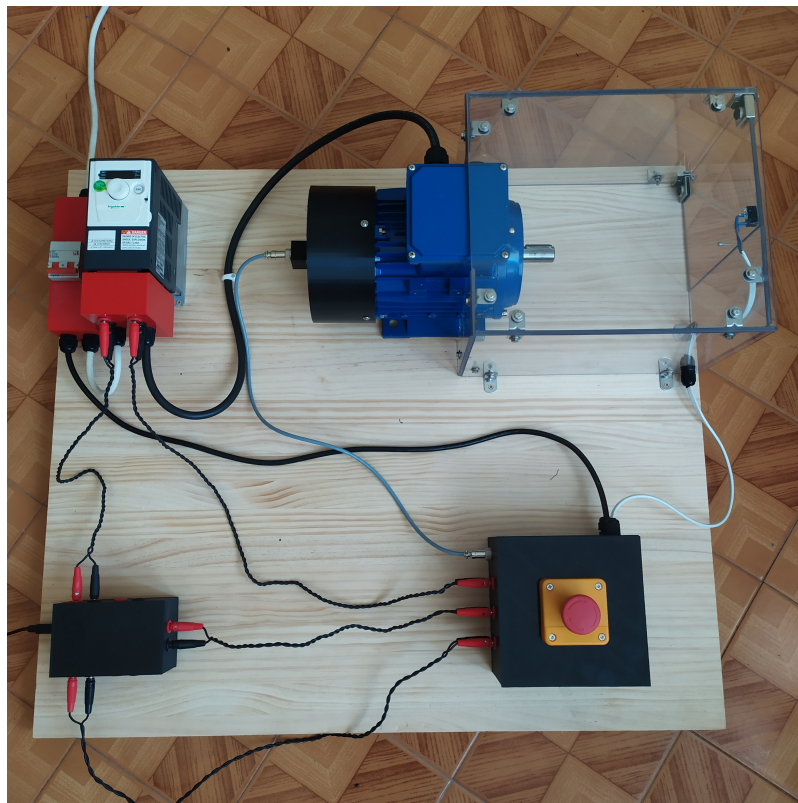
- Variador de frecuencia e interruptor magnetotérmico.

**Figura 8.59** – Montaje del variador de frecuencia e interruptor magnetotérmico

Tanto en la caja general como en la del sistema de adquisición de datos los diferentes componentes se sitúan sobre una plancha de cartón rígido, de las dimensiones del interior de cada caja. Para fijarlos al cartón se utiliza velcro para facilitar la extracción de los mismo en caso de que sea necesario.

Por otra parte, en la caja general del sistema, y con el objetivo de facilitar la conexión de los terminales de alimentación de los diferentes componentes (módulo temporizador, circuito de acondicionamiento y microcontrolador), se coloca una pequeña placa dispuesta de cuatro bornas de 2 polos, conectadas a la fuente de alimentación DC.

Finalmente el montaje del sistema se puede apreciar en la Figura 8.60.



**Figura 8.60** – Montaje del banco de pruebas para motor trifásico

Como se puede observar en la imagen, Figura 8.60, para la conexión de los diferentes dispositivos se emplean los siguientes cables:

- Cable tripolar H05VV F (3x1.5mm<sup>2</sup>) con conector Schuko macho para la alimentación del banco de pruebas.
- Cable tripolar H05VV F (3x1.5mm<sup>2</sup>) para la conexión del interruptor magnetotérmico a la fuente de alimentación DC y al variador de frecuencia.
- Cable tetrapolar (4G - 1.5mm<sup>2</sup>) para la alimentación del motor trifásico con la tensión de salida del variador de frecuencia.
- Cable bipolar (2x1mm<sup>2</sup>) para la conexión del final de carrera al circuito de marcha/-paro.

- Cable bipolar trenzado ( $2 \times 1 \text{ mm}^2$ ) para las conexiones de tensiones de control entre los diferentes dispositivos.
  - Cable de 4 hilos para sensores ( $4 \times 0.25 \text{ mm}^2$ ) para la conexión del sensor.
5. Ajuste de la temporización del módulo temporizador por medio del potenciómetro. El valor de temporización se ajusta de forma empírica para las necesidades del variador.
6. Configuración del variador de frecuencia.

Una vez realizado el montaje, y conectados los diferentes dispositivos, será imprescindible configurar el variador de frecuencia para que trabaje adecuadamente con los requerimientos del motor empleado.

Para configurar el variador se seguirá la *Guía de inicio rápido - ATV312* [24] facilitada por Schneider.

Los parámetros de configuración empleados para el presente proyecto son los siguientes:

- **Frecuencia estándar del motor** (código *bFr*): 50.0 Hz.
- **Tensión nominal del motor** (código *unS*): 230 V.
- **Frecuencia nominal del motor** (código *FrS*): 50.0 Hz.
- **Intensidad nominal del motor** (código *nCr*): 3.3 A.
- **Velocidad nominal del motor (carga)** (código *nSP*): 1380 r.p.m.
- **Coseno de fi del motor** (código *CoS*): 0.78.

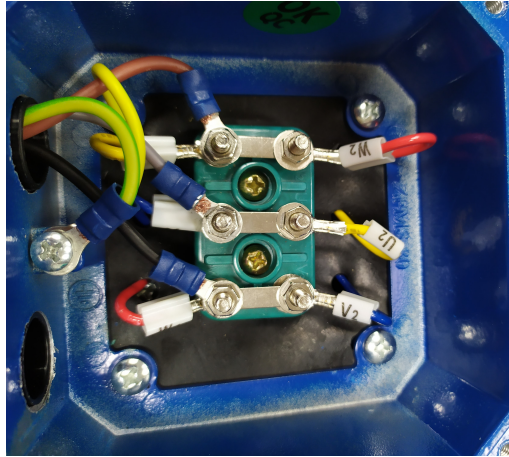
Todos estos parámetros se pueden obtener de la placa de características del motor 8.2.

También se modificarán las rampas de aceleración y deceleración del variador, con el objetivo de ralentizar el sistema y adecuarlo a las características de los componentes empleados en él, en concreto del sensor de velocidad empleado.

- **Tiempo de aceleración (segundos)** (código *ACC*): 6.0 s.
- **Tiempo de deceleración (segundos)** (código *dEC*): 6.0 s.

El resto de parámetros que no se reflejan en las listas anteriores y que aparecen en la *Guía de inicio rápido - ATV312* se dejan con los valores del ajuste de fábrica.

Antes de poner en marcha el sistema también es necesario comprobar la correcta conexión de los bornes del motor. Para este caso, y ya que la señal de salida del variador de frecuencia es de 230V, la conexión del motor corresponderá con una conexión en triángulo, que es la que se adapta a este valor de tensión.



**Figura 8.61** – Conexión triángulo bornes del motor

7. Conexión del programa de control, Matlab, con el sistema. Para ello será necesario seguir los pasos indicados en el *Manual de Usuario de la tarjeta de adquisición de datos*, Apartado 12.7.
8. Obtención de los parámetros de ajuste del regulador PID. Este proceso se puede ver reflejado en el apartado 11.3.
9. Ejecución de los diferentes reguladores disponibles, para diferentes valores de consigna.

## 8.15. Resultados obtenidos y conclusiones

Realizado el montaje y la puesta en marcha del banco de pruebas, se procede a ejecutar el algoritmo de control.

Antes de proceder a mostrar las gráficas obtenidas, es importante destacar que, las pruebas realizadas se han efectuado con el motor en vacío sin acoplarle ninguna carga, pues no ha sido posible conseguir tanto el acople motor-carga como los propios discos. Como consecuencia de esto, el sistema sobre el que se trabajará tiene una máxima velocidad de 1500 r.p.m. y, como se verá en las siguientes gráficas, el sistema no presentará las oscilaciones que se obtienen al añadir un peso en el eje del motor.

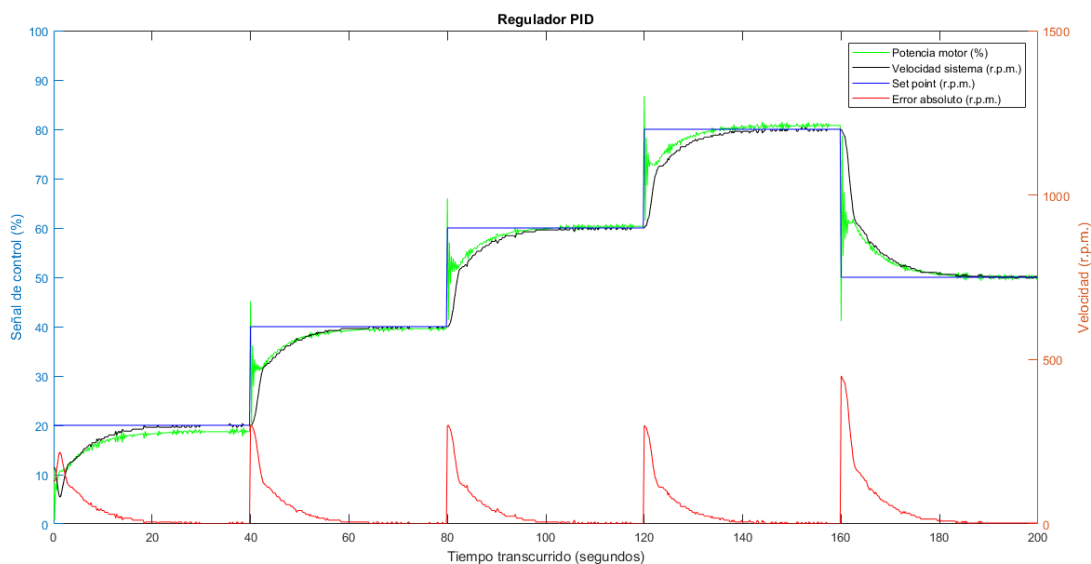
Los datos de partida para la realización de las pruebas son los siguientes (la obtención de estos parámetros se muestra en el apartado 11.3):

- Tiempo de muestreo,  $T_s = 0,2$  s.
- Constante proporcional,  $K_p = 0,5$ .
- Constante de integración,  $T_i = 2,25$  s.
- Constante de derivación,  $T_d = 0,2$  s.
- Constante de autoajuste,  $N = 8$ .

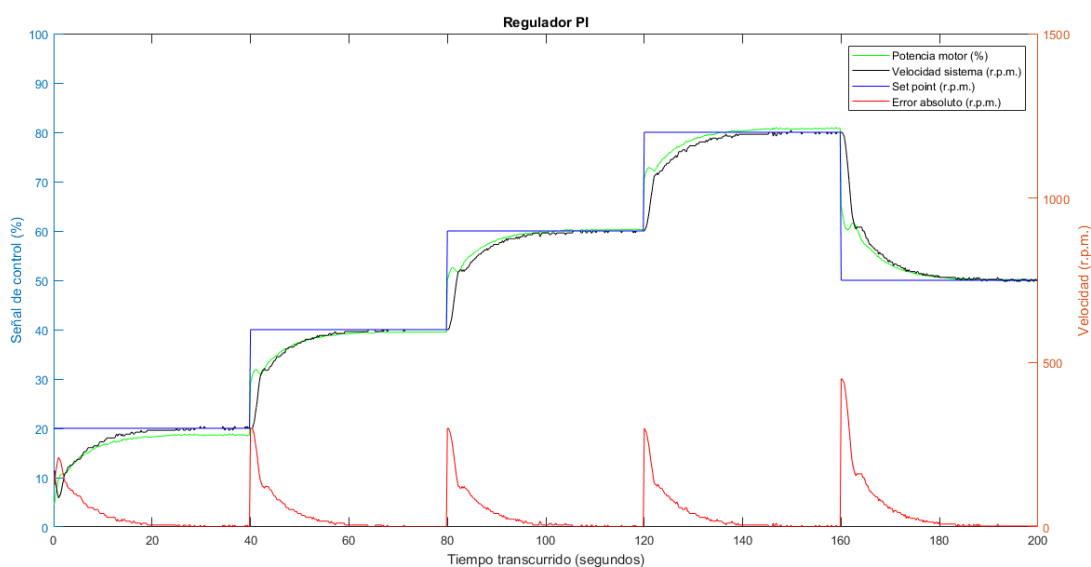


Además, como señal de consigna se emplea un vector con diferentes valores de velocidad.

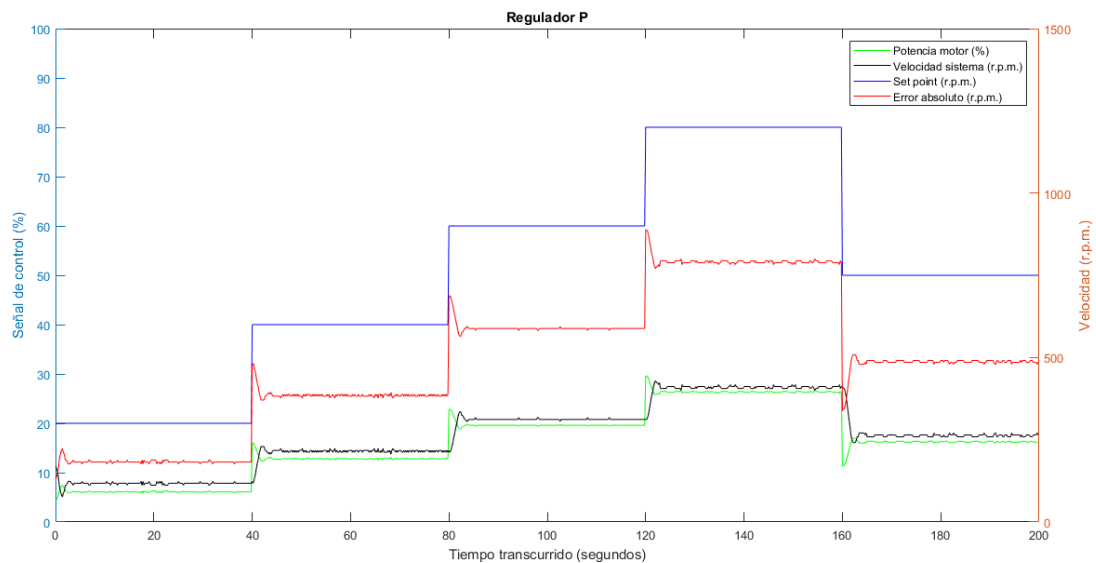
Las gráficas que se obtienen tanto para el regulador PID, PI y P son:



**Figura 8.62 – Regulación del sistema con regulador PID**



**Figura 8.63 – Regulación del sistema con regulador PI**



**Figura 8.64 – Regulación del sistema con regulador P**

Para las gráficas expuestas sobre estas líneas, Figuras 8.62, 8.63 y 8.64, destacar que, en color rojo se muestra el error absoluto del sistema, en color azul el valor de consigna, en color verde la señal de control enviada al variador y en negro la velocidad del sistema (señal de realimentación).

Como se puede observar, el comportamiento del sistema se asemeja al de un sistema de primer orden, sin oscilaciones, y disminuyendo su pendiente hasta llegar al valor de consigna. Además, se puede apreciar cómo el controlador P no es capaz de regular de forma óptima el sistema ya que se presenta un error de posición. Esta respuesta es frecuente en este tipo de reguladores.

Por otro lado, comparando las gráficas obtenidas con el regulador PI y PID, Figuras 8.63 y 8.62 respectivamente, se puede apreciar como la acción derivativa provoca unos cambios en la señal de control al inicio del cambio de consigna. Esto se debe a pequeñas variaciones sobre la señal de realimentación del sistema.

Con el objetivo de obtener una mayor durabilidad del motor empleado en el banco de pruebas, se puede concluir que el regulador que mejor se comporta para este caso es un regulador PI, ya que la señal de control es mucho más suave que en el PID, mejorando el rendimiento del motor.

## **9 ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS**

1. Planos.
2. Pliego de Condiciones.
3. Presupuesto.
4. Memoria.



**TÍTULO: BANCO DE PRUEBAS PARA MONITORIZACIÓN Y CONTROL  
DE MOTOR TRIFÁSICO**

---

# **ANEXOS**

---

**PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

**AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N**

**15405 - FERROL**

**FECHA: JUNIO DE 2020**

**AUTOR: EL ALUMNO**

**Fdo.: ÁLVARO MICHELENA GRANDÍO**



## Índice del documento ANEXOS

<b>10 DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA</b>	<b>131</b>
10.1 Propuesta inicial de asignación del TFG . . . . .	131
<b>11 CÁLCULOS</b>	<b>134</b>
11.1 Cálculos relacionados con los circuitos de acondicionamiento de señales . . . . .	134
11.1.1 Cálculo del circuito de filtrado y amplificación de la señal PWM de salida del Arduino UNO para el acondicionamiento del sensor . . . . .	134
11.1.1.1 Cálculo del filtro paso bajo . . . . .	134
11.1.1.2 Cálculo del circuito de amplificación . . . . .	135
11.1.2 Cálculo del circuito de acondicionamiento de las señales de entrada y salida del DAQ . . . . .	136
11.1.2.1 Cálculo del circuito de acondicionamiento de las señales de entrada del DAQ . . . . .	136
11.1.2.2 Cálculo del circuito de acondicionamiento de las señales de salida del DAQ . . . . .	137
11.2 Cálculos relacionados con el dimensionado del magnetotérmico . . . . .	138
11.3 Cálculo de los parámetros del regulador PID . . . . .	139
<b>12 OTROS ANEXOS</b>	<b>143</b>
12.1 Características y configuración de pines del microcontrolador Arduino Uno [16] [21] . . . . .	143
12.2 Diseño y análisis del algoritmo de adaptación de la señal del codificador de velocidad . . . . .	146
12.3 Simulación de los circuitos electrónicos . . . . .	148
12.3.1 Simulación del circuito de acondicionamiento del sensor . . . . .	148
12.3.1.1 Simulación del filtro pasivo paso bajo de primer orden . . . . .	148
12.3.1.2 Simulación del amplificador no inversor . . . . .	150
12.3.1.3 Simulación del circuito de adaptación (filtrado+amplificación) . . . . .	150
12.3.2 Simulación de los circuitos de acondicionamiento de las señales del DAQ . . . . .	151
12.3.2.1 Simulación del circuito de adaptación de la salida . . . . .	151
12.3.2.2 Simulación del circuito de adaptación de la entrada . . . . .	151
12.4 Parámetros de impresión 3D para la fabricación de las piezas que conforman el diseño . . . . .	152
12.4.0.1 Soporte del imán del sensor (20 C.P.R.) . . . . .	153
12.4.0.2 Carcasa del sistema de ventilación del motor y soporte del codificador . . . . .	153
12.4.0.3 Soporte del conector 4 pines para la conexión del sensor . . . . .	154
12.4.0.4 Soporte de las tuercas para la fijación del soporte de conexión del motor . . . . .	154

12.4.0.5	Caja para el sistema de adquisición de datos (DAQ) . . . . .	155
12.4.0.6	Tapa para la caja del sistema de adquisición de datos (DAQ) . .	155
12.4.0.7	Caja general del proyecto . . . . .	156
12.4.0.8	Tapa para la caja general del proyecto (soporte seta de emergencia) . . . . .	156
12.4.0.9	Carcasa de protección de los contactos del variador de frecuencia	157
12.4.0.10	Carcasa de protección de los contactos del interruptor magnotérmico . . . . .	157
12.5	Funciones de Arduino empleadas en el algoritmo de la DAQ . . . . .	158
12.6	Códigos de programación . . . . .	158
12.6.1	Códigos de programación de Arduino UNO . . . . .	158
12.6.1.1	Código de programación para el Arduino del acondicionamiento de la señal del sensor . . . . .	158
12.6.1.2	Código de programación para el Arduino DAQ . . . . .	160
12.6.2	Códigos de programación de Matlab . . . . .	162
12.6.2.1	DAQ_Start . . . . .	162
12.6.2.2	DAQ_Stop . . . . .	163
12.6.2.3	DAQ_Read . . . . .	163
12.6.2.4	DAQ_Write . . . . .	164
12.6.2.5	Relay-Feedback . . . . .	165
12.6.2.6	Función <i>graficar</i> . . . . .	165
12.6.2.7	Función <i>calculocoeficientes</i> . . . . .	166
12.6.2.8	Algoritmo de control PID . . . . .	166
12.6.2.9	Algoritmo de control PID (modificado) . . . . .	168
12.7	Manual de Usuario de la tarjeta de adquisición de datos (Arduino como DAQ) . .	170



## **10 DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA**

### **10.1. Propuesta inicial de asignación del TFG**



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

## ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

### ASIGNACIÓN DE TRABAJO FIN DE GRADO

**En virtud de la solicitud efectuada por:**

*En virtude da solicitude efectuada por:*

**APELLIDOS, NOMBRE:** *Michelena Grandío, Álvaro*

**APELIDOS E NOME:**

**DNI:**

*DNI:*

**Fecha de Solicitud:** OCT2019

*Data de Solicitude:*

**Alumno de esta escuela en la titulación de Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, se le comunica que la Comisión de Proyectos ha decidido asignarle en siguiente Trabajo Fin de Grado:**

*Alumno de esta escola na titulación de Grao en Enxeñaría Electrónica Industrial e Automática comunícaselle que a Comisión de Proxectos decidiu asignarlle o seguinte Traballo Fin de Grao:*

**Título TFG:** *Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico*

**Número TFG:** *770G01A190*

**Tutor:** *Calvo Rolle, José Luis*

**Cotutor:** *Jove Pérez, Esteban*

**La descripción y objetivos del Trabajo son los que figuran en el reverso de este documento:**

*A descrición e obxectivos do proxecto son os que figuran no reverso deste documento.*

*Ferrol, Xoves, 11 de xuño de 2020*

Retirei o meu Traballo Fin de Grao o día \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ do ano \_\_\_\_\_

*Fdo: Michelena Grandío, Álvaro*

## **DESCRIPCIÓN Y OBJETIVO:**

### **Objeto:**

El presente trabajo fin de grado tiene por objetivo definir y diseñar un banco de pruebas con motor trifásico.

Dicho banco ha de incluir todo lo necesario para la correcta monitorización del motor, así como para su control.

El accionamiento del motor se efectuará mediante un variador de frecuencia.

Se empleará como sistema de adquisición de datos, y el software de programación desde PC será tipo Matlab/Simulink o similar.

Contemplará un lazo de control de velocidad.

Ha de incluir todas las medidas de seguridad necesarias para una protección óptima de usuarios.

### **Alcance:**

Estudio y documentación pormenorizada de las diferentes posibilidades para los objetivos propuestos.

- Definición de los diferentes materiales que se usarán realizando un concienzudo análisis de las soluciones.
- Estudio y documentación detallado de la configuración y uso de la tarjeta de adquisición de datos. Se ha de generar un Manual de Usuario.
- Montaje del sistema.
- Programación de un lazo de control tipo PID de control de velocidad.
- Se deberá de contemplar la posibilidad de añadir diferentes cargas al motor.
- La edición del documento se efectuará preferiblemente en Latex.
- Realización de pruebas de manejo y monitorización.

## 11 CÁLCULOS

### 11.1. Cálculos relacionados con los circuitos de acondicionamiento de señales

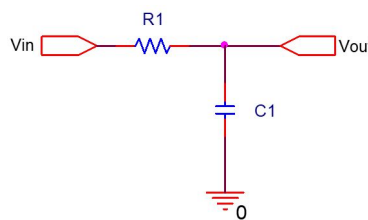
En este apartado se reflejarán los cálculos realizados para el circuito de acondicionamiento de la salida del sensor, así como, los de las señales del DAQ.

#### 11.1.1. Cálculo del circuito de filtrado y amplificación de la señal PWM de salida del Arduino UNO para el acondicionamiento del sensor

Como ya se expuso en apartados anteriores, este circuito estará compuesto por un filtro paso bajo y un circuito no inversor de amplificación (Figura 8.18).

##### 11.1.1.1. Cálculo del filtro paso bajo

La primera etapa en la adaptación de la señal PWM de salida es el filtrado, con el que se obtendrá únicamente la componente continua de la señal, empleando para ello un filtro pasivo paso bajo de primer orden.



**Figura 11.1** – Filtro pasivo paso bajo primer orden

Para este proyecto la señal PWM de salida del Arduino tendrá una frecuencia de 31.37 kHz.

Para realizar los cálculos se establece como dato de partida que el armónico fundamental de la señal PWM, es decir, el armónico de frecuencia 31.37 kHz debe ser atenuado 60 dB.

De esta manera, y teniendo en cuenta la fórmula del módulo (en dB) de un filtro paso bajo, se puede obtener la frecuencia de corte máxima del filtro, Ecuación 11.2.

$$|A|_{dB} = 20 \cdot \log \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{f}{f_{corte}} \right)^2}} \right) \quad (11.1)$$

$$-60dB \geq 20 \cdot \log \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{31,37kHz}{f_{corte}} \right)^2}} \right) \rightarrow f_{corte} \leq 31,37Hz \quad (11.2)$$

Como se puede observar la frecuencia de corte del filtro deberá de ser como máximo de 31.37 Hz para que el armónico principal de la señal PWM se atenúe 60 dB.

Conociendo la frecuencia de corte del filtro se podrá calcular el valor de sus componentes, por medio de la fórmula de la frecuencia de corte del filtro pasivo paso bajo, Ecuación 11.3.

$$f_{corte} = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (11.3)$$

Suponiendo un condensador de  $1 \mu F$  se obtiene:

$$31,37Hz \geq \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot 1\mu F} \rightarrow R \geq 5073,48\Omega \quad (11.4)$$

Para un condensador de  $1 \mu F$ , el valor de la resistencia tendrá que ser como mínimo de  $5073.48 \Omega$ . En este caso se selecciona una resistencia de valor  $5.1 k\Omega$  (valor comercial), con la que se obtiene una frecuencia de corte de 31,2 Hz (Ecuación 11.5).

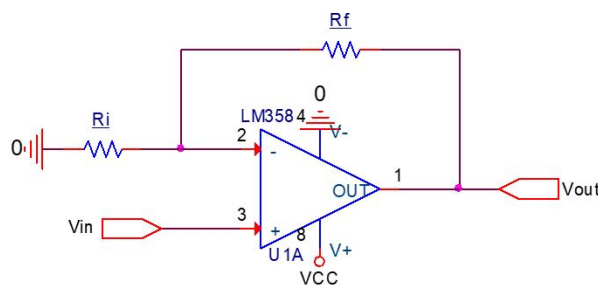
$$f_{corte} = \frac{1}{2\pi \cdot 5,1k\Omega \cdot 1\mu F} \rightarrow f_{corte} = 31,2Hz \quad (11.5)$$

Como se puede observar la frecuencia de corte que se obtiene es menor que la frecuencia máxima reflejada en la ecuación 11.2, por lo que el filtro cumple con la condición de partida.

#### 11.1.1.2. Cálculo del circuito de amplificación

Una vez dimensionados los componentes del filtro paso bajo, con el que se obtiene la componente continua de la señal, en un rango de 0 a 5V, será imprescindible amplificarla a un rango de 0 a 10V para poder cumplir con los requisitos del proyecto (Apartado 6).

Para conseguir este objetivo se empleará un circuito amplificador no inversor al que se le conectará como señal de entrada la señal filtrada.



**Figura 11.2 – Circuito amplificador no inversor**

La ganancia de este amplificador tendrá que ser tal que, cuando el filtro tenga una salida de 5V, a la salida del amplificador se obtengan 10V.

$$Ganancia = \left| \frac{V_{salida}}{V_{entrada}} \right| \rightarrow Ganancia = \left| \frac{10V}{5V} \right| \rightarrow Ganancia = 2 \quad (11.6)$$

Además, se sabe que la ganancia para un amplificador no inversor es:

$$Ganancia = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (11.7)$$

Por lo que la relación de resistencias será:

$$Ganancia = 1 + \frac{R_f}{R_i} \rightarrow 2 = 1 + \frac{R_f}{R_i} \rightarrow R_i = R_f \quad (11.8)$$

Para este proyecto se emplearán resistencias de  $10\text{ k}\Omega$  con el objetivo de que, tanto en la patilla positiva como en la negativa del A.O., la resistencia equivalente de Thevenin sea lo más cercana posible para eliminar el error de offset. Cabe destacar que para la patilla positiva del A.O. la resistencia de Thevenin corresponde a la del filtro paso bajo  $5,1\text{ k}\Omega$ , en cambio, para la patilla negativa, la resistencia equivalente de Thevenin sería el paralelo de las resistencias  $R_f$  y  $R_i$ , es decir  $5\text{ k}\Omega$ .

Por otro lado el A.O. seleccionado fue el LM358 puesto que se adaptaba a la alimentación (12V DC) y funcionalidades del proyecto.

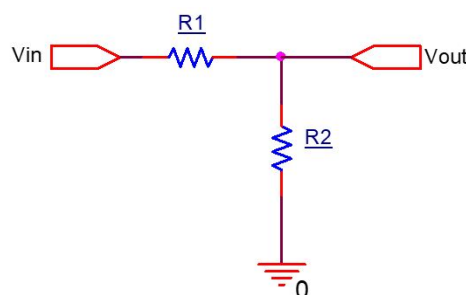
NOTA: A la hora de seleccionar los datos de partida para el dimensionado de los componentes del filtro paso bajo, explicado en el apartado 11.1.1.1, se ha tenido en cuenta que el circuito de amplificación también amplifica, en este caso con ganancia 2, a los armónicos no deseados.

### 11.1.2. Cálculo del circuito de acondicionamiento de las señales de entrada y salida del DAQ

#### 11.1.2.1. Cálculo del circuito de acondicionamiento de las señales de entrada del DAQ

El uso del microcontrolador Arduino como DAQ provoca que sea necesario reducir la tensión de entrada del sistema de adquisición de datos (0/10V) a una tensión 0/5V.

Para llevar a cabo este proceso se empleará un divisor de tensión .



**Figura 11.3 – Divisor de tensión**

El divisor de tensión tendrá que ser capaz de reducir la tensión de tal forma que, cuando a la entrada del circuito haya una tensión de 10 V, a la salida se obtenga 5V, es decir, debe reducir el valor de la entrada a la mitad. De esta manera, el divisor tendrá que tener una ganancia de 0,5.

Empleando la fórmula del divisor de tensión y conociendo el valor de la ganancia, se puede calcular la relación de resistencias:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow \text{Ganancia} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (11.9)$$

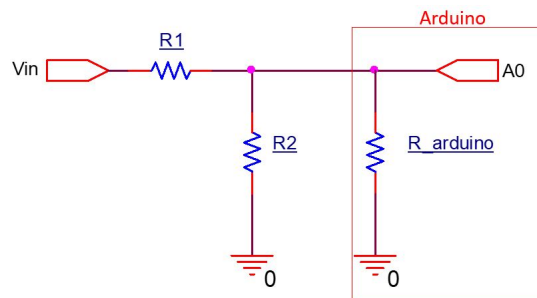
$$\text{Ganancia} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow 2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow R_1 = R_2 \quad (11.10)$$

Conocida la relación de resistencias, será necesario obtener la corriente máxima del voltaje de entrada del divisor.

En el proyecto, la entrada del divisor corresponde con la salida del circuito de adaptación de la señal del codificador, por lo que la corriente de entrada del divisor, estará limitada por la corriente de salida del A.O. LM358.

En el datasheet del LM358 [20] se especifica que la corriente máxima de salida es de 60 mA.

Otra cuestión a tener en cuenta para el dimensionado de las resistencias del divisor, es la impedancia de entrada del pin analógico de Arduino, ya que afectará al funcionamiento del propio divisor.



**Figura 11.4 – Conexión divisor de tensión con Arduino**

Consultando el datasheet del microcontrolador ATmega328P [21] (Arduino), se obtiene que la impedancia de entrada de los pines analógicos es de  $100\text{ M}\Omega$ .

Por estos motivos, el valor de las resistencias del divisor de tensión es de  $10\text{ k}\Omega$ . Con este valor, al ser mucho menor que la impedancia de entrada del pin analógico, ésta no afectará al propio divisor. Además, la máxima corriente de circulación del divisor, será muy inferior a la máxima intensidad suministrada por el A.O. (60 mA):

$$I = \frac{V}{R} \rightarrow I = \frac{10V}{10k\Omega + 10k\Omega} \rightarrow I = 0,5mA \quad (11.11)$$

#### 11.1.2.2. Cálculo del circuito de acondicionamiento de las señales de salida del DAQ

Como ya se comentó en apartados anteriores, el circuito de acondicionamiento de la señal de salida del DAQ debe cumplir el mismo objetivo que el circuito de adaptación de la señal de salida del codificador. Es decir, debe de filtrar la PWM de salida del Arduino y amplificarla a valores de 0/10V. Por ello, y además de que en el DAQ se trabaja con la misma frecuencia de

PWM que la del Arduino de adaptación del sensor, tanto el circuito como los cálculos de los valores de los componentes serán los mismo que los presentados en el apartado 11.1.1.

## 11.2. Cálculos relacionados con el dimensionado del magnetotérmico

Para dimensionar el valor del magnetotérmico, será necesario conocer el consumo total tanto de la fuente de alimentación DC como del variador de frecuencia.

El consumo de la fuente de alimentación se calculará empleando la fórmula de la potencia, ya que se conoce la propia potencia de la fuente, así como la tensión de alimentación de la misma (tensión de red 230V).

$$Potencia = V \cdot I \rightarrow 35W = 230V \cdot I \rightarrow I \simeq 0,152A \quad (11.12)$$

Por otro lado, el consumo del variador de frecuencia se puede obtener consultando la hoja de características del modelo seleccionado [18]. Para el ATV312H075M2 el consumo máximo de corriente de línea es de 8,9 A con alimentación 200 V. No obstante, en el proyecto la tensión de alimentación será de 230V, por lo que la corriente consumida será ligeramente inferior. Con el objetivo de dejar un pequeño margen de consumo se empleará 8,9 A como consumo teórico del variador.

De esta forma el conjunto consumirá un total de 9,052 A, por lo que el magnetotérmico tendrá el valor normalizado superior al consumo del sistema. En este caso será de 10 A.



### 11.3. Cálculo de los parámetros del regulador PID

Como ya se expuso en el apartado 8.13.1, el método empleado para la obtención de los parámetros del regulador PID es el *Relay-Feedback*. Para ello se ejecuta el algoritmo diseñado, Apartado 12.6.2.5, con los siguientes datos de entrada:

- Tiempo de muestreo de 0,2 s.
- Valor de consigna ( $d$ ) de 900 r.p.m.
- Ancho de ventana ( $h$ ) de 150 r.p.m.

Con estos valores se obtiene la gráfica de la Figura 11.5.

NOTA: todas las pruebas realizadas, así como los cálculos ejecutados, corresponden con el sistema sin ninguna carga acoplada, puesto que no se pudieron conseguir en el plazo necesario.

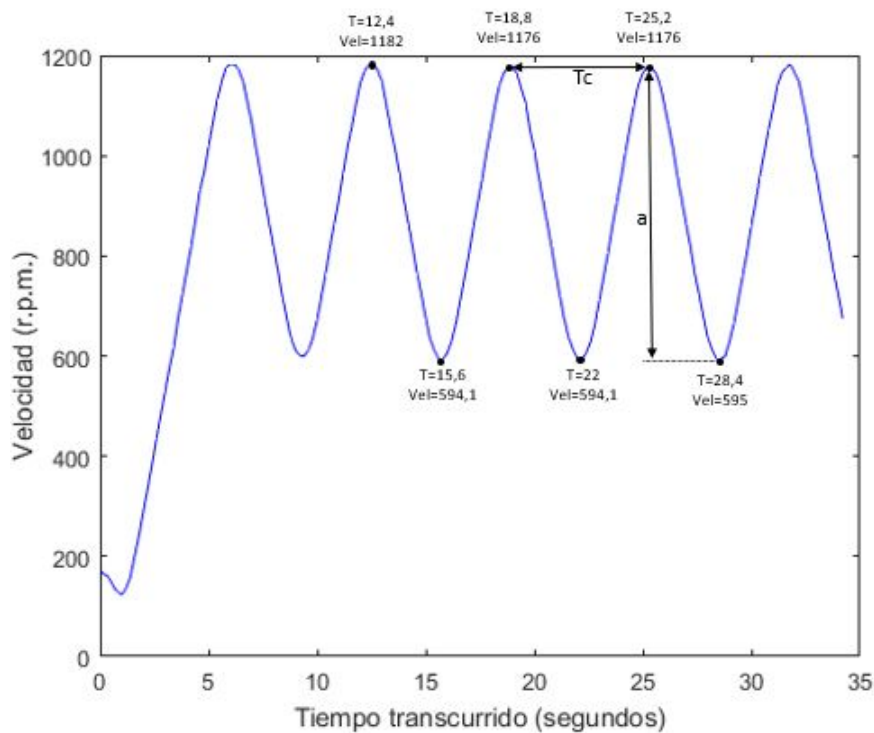


Figura 11.5 – Gráfica obtenida con el *Relay-Feedback*

A partir de la gráfica, se calcula varios valores de  $T_c$  y de  $a$ . Efectuando la media de estos datos se obtiene un valor de 6,4 para  $T_c$  y 584,9 para  $a$ .

Según estos datos y, teniendo en cuenta tanto el ancho de ventana ( $h$ ) como el valor de consigna ( $d$ ), se calcula la ganancia crítica del sistema.

$$K_c = \frac{4d}{\pi\sqrt{a^2 - h^2}} = \frac{4 \cdot 60}{\pi\sqrt{584,9^2 - 10^2}} = 2,027 \quad (11.13)$$

Calculados los valores de  $T_c$  y  $K_c$ , y aplicando las fórmulas de *Ziegler-Nichols* en cadena cerrada se obtiene los parámetros del regulador PID:

$$K_p = 0,6 \times K_c = 0,6 \times 2,027 = 1,216 \quad (11.14)$$

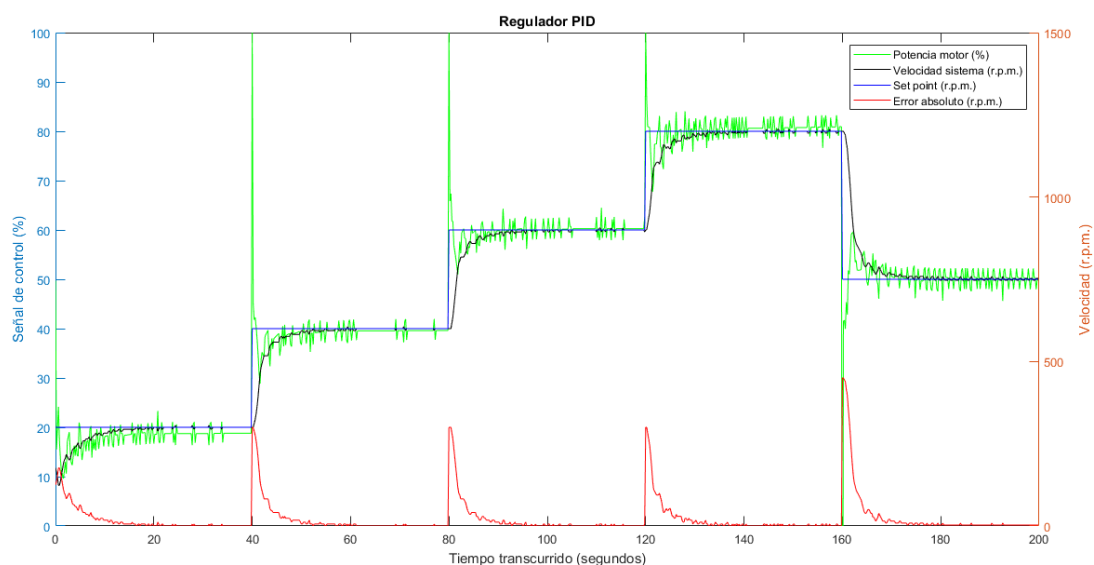
$$T_i = 0,5 \times T_c = 0,5 \times 6,4 = 3,2 \quad (11.15)$$

$$T_d = 0,125 \times T_c = 0,125 \times 6,4 = 0,8 \quad (11.16)$$

Además también es necesario regular el parámetro N. El ajuste de este parámetro, cuyo valor suele situarse entre 8 y 20, se realizó de forma empírica obteniéndose la mejor respuesta para un valor de 8.

Calculados los diferentes parámetros de ajuste se procedió a comprobar el funcionamiento del regulador con esos parámetros. El tiempo de muestreo que se emplea para la ejecución de los algoritmos de control es de 200 ms.

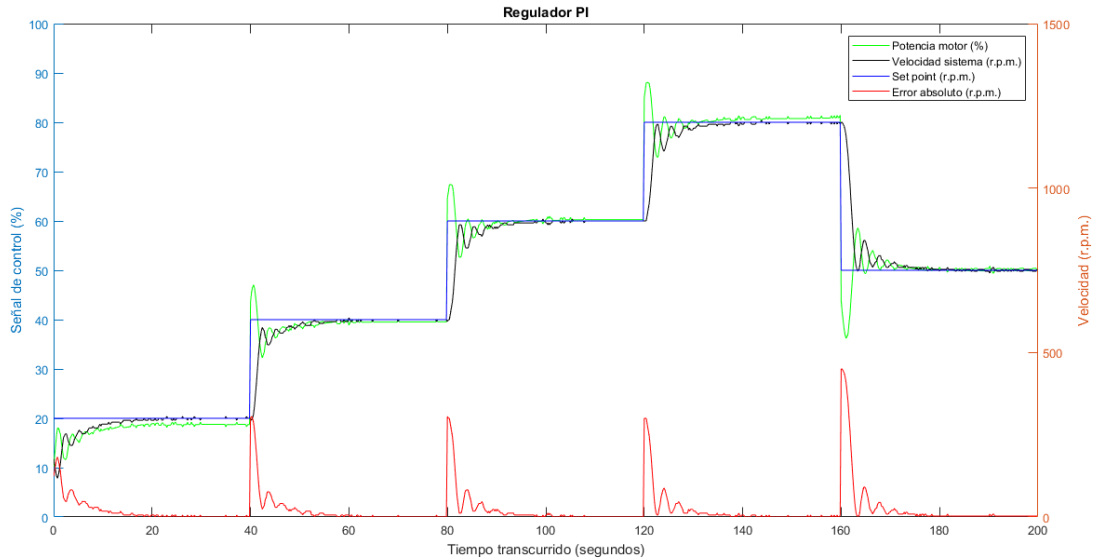
La gráfica que se obtiene para un regulador PID es la siguiente:



**Figura 11.6** – Gráfica obtenida con regulador PID con los parámetros de Ziegler-Nichols

Como se puede observar, en color verde, la potencia del motor oscila bastante, lo cual no es recomendable para el correcto funcionamiento y rendimiento del motor. Estas variaciones son provocadas en gran medida por los pequeños errores de la señal de realimentación del sistema y por el propio ruido de la señal.

Prescindiendo de la acción derivativa estas oscilaciones se pueden corregir en gran medida, por lo que se ejecuta el programa para un regulador PI con el que se obtiene la siguiente respuesta.



**Figura 11.7** – Gráfica obtenida con regulador PI con los parámetros de Ziegler-Nichols

Como se puede observar en la gráfica, la señal de control se suaviza en gran medida, no obstante se pueden apreciar unas oscilaciones de la velocidad del sistema (en color negro) antes de alcanzar el valor de consigna. Estas oscilaciones indican que el sistema puede estar próximo a inestabilizarse por lo que resulta importante eliminarlas o reducirlas.

Como consecuencia de los problemas expuestos anteriormente, es necesario realizar un ajuste fino de forma empírica puesto que las fórmulas de *Ziegler-Nichols* no aportan una regulación satisfactoria del sistema. Esta falta de adaptación de las fórmulas puede deberse a varios factores:

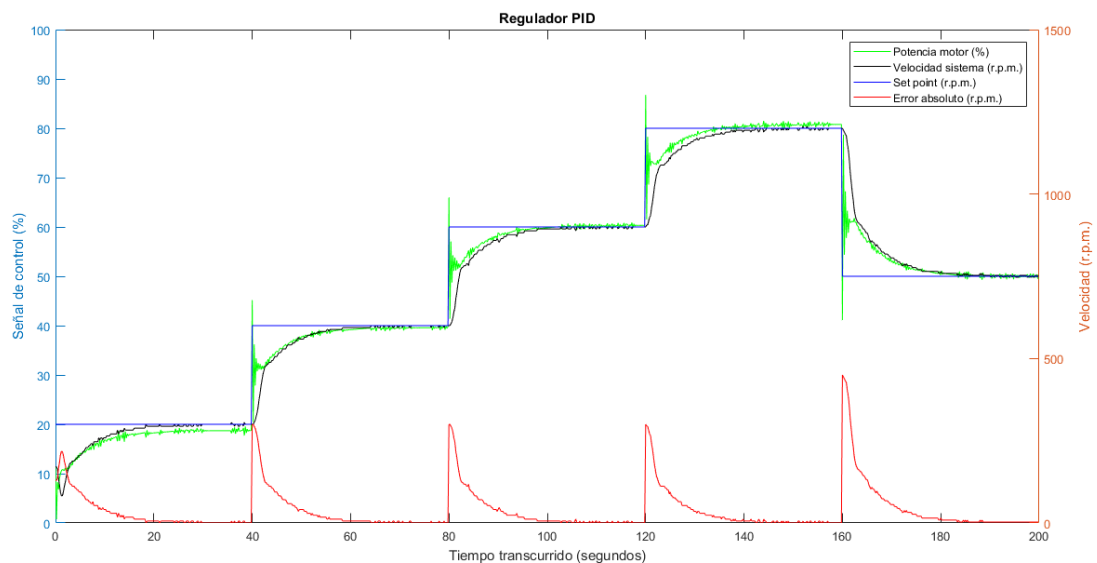
- El sistema está en el límite del rango de aplicación ya que la ganancia crítica ( $K_c$ ) es de 2,027 y la ganancia del sistema ( $k$ ) es unitaria (ya que el motor está en vacío por lo que la variación de la señal de consigna afectará en la misma proporcionalidad a la velocidad del sistema).
- Problemas con el ruido de la señal de realimentación.
- Factores relacionados con la propia dinámica del sistema.

De una forma empírica, partiendo de los resultados obtenidos con las fórmulas de *Ziegler-Nichols*, y teniendo en cuenta como afecta cada uno de los parámetros de ajuste a la señal de salida del sistema, se concluye que los parámetros que mejor se ajustan en estas circunstancias son:

- $N = 8$
- $K_p = 0,5$
- $T_i = 2,25$

■  $T_d = 0,2$

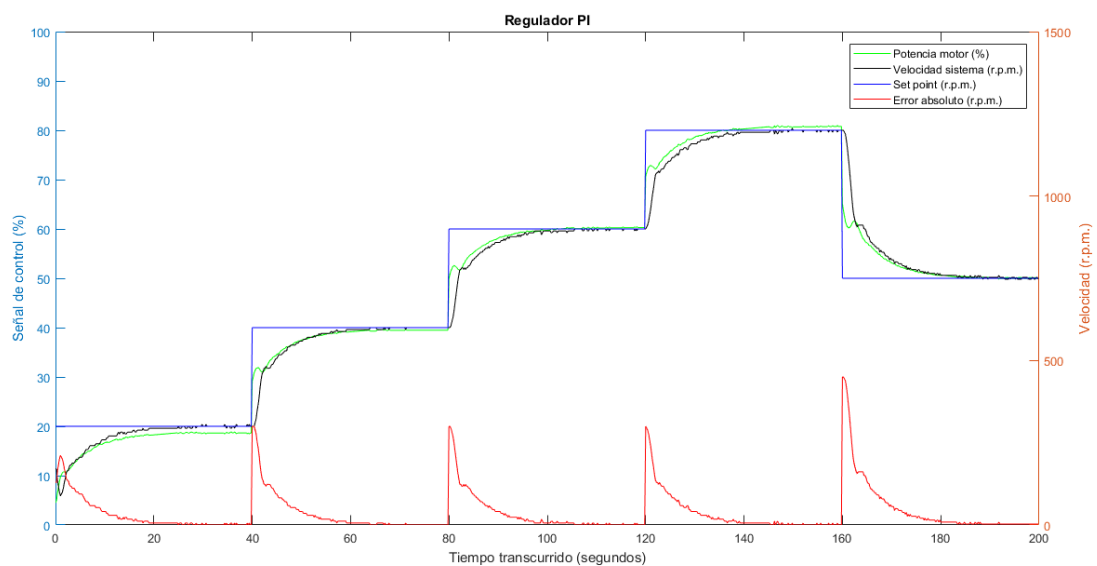
Para estos datos, la gráfica que se obtiene para un regulador PID es la siguiente:



**Figura 11.8** – Gráfica obtenida con regulador PID con ajuste fino de sus parámetros

Como se puede observar, para los parámetros ajustados, la señal de control se estabiliza y se suaviza en gran medida, eliminándose las oscilaciones que se producían con el empleo de los parámetros obtenidos por las fórmulas de *Ziegler-Nichols*, Figura 11.6.

Además, por otra parte, analizando el comportamiento del sistema para un regulador PI se obtiene:

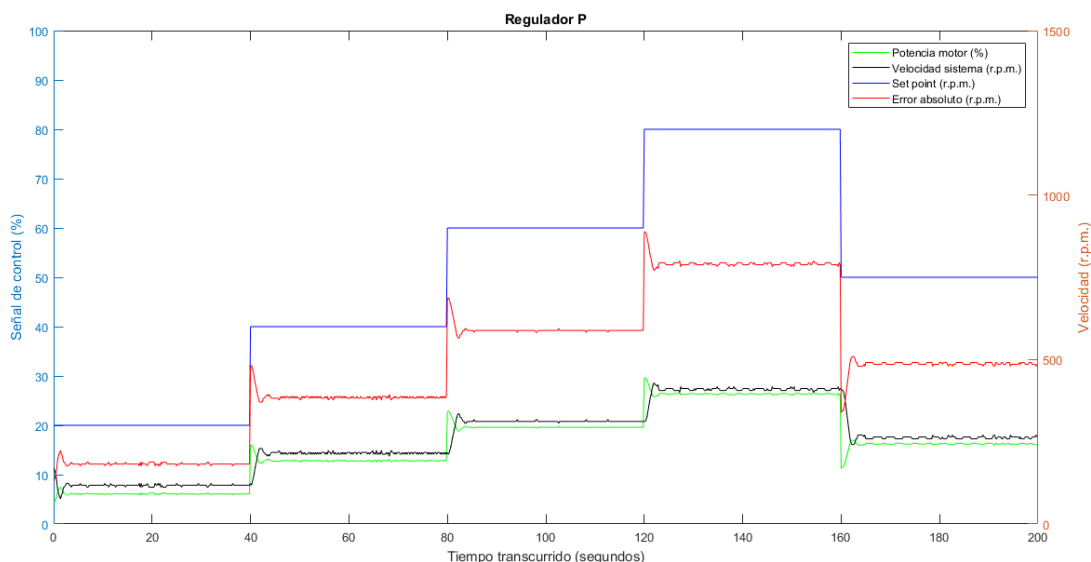


**Figura 11.9** – Gráfica obtenida con regulador PI con ajuste fino de sus parámetros

Como se puede observar, la respuesta del sistema ya no presenta oscilaciones antes de

alcanzar el valor de consigna, y su respuesta se asemeja en gran medida a la respuesta típica de sistemas de primer orden.

Por último, y para completar el estudio de la respuesta del sistema ante diferentes reguladores, se procede a ejecutar un regulador P con el que se obtiene la siguiente gráfica:



**Figura 11.10** – Gráfica obtenida con regulador P con ajuste fino de sus parámetros

Observando la gráfica obtenida con el regulador P se puede comprobar como no se llega a alcanzar la señal de consigna. Este tipo de respuesta es típico de esta clase de reguladores, ya que por si solos no son capaces de eliminar el error de posición.

A modo de conclusión, se puede destacar la mejoría que se produce a la hora de regular el sistema empleando los parámetros obtenidos empíricamente por medio de un ajuste fino del sistema.

## 12 OTROS ANEXOS

### 12.1. Características y configuración de pines del microcontrolador Arduino Uno [16] [21]

Arduino Uno es un microcontrolador de bajo coste y software de código abierto, diseñado por la empresa Arduino, y cuyas principales características técnicas son:

Características microcontrolador Arduino	
Modelo	Arduino Uno Rev 3
Microcontrolador	ATmega328
Memoria Flash	32 kB
Sram	2 kB
Tensión de alimentación	5/12V
Nº de entradas analógicas	6
Tensión de entradas analógicas	0/5V
Resolución de las entradas analógicas	10 bits
Nº de e/s digitales	14 (6 con salida PWM)
Tensión de e/s digitales	0-5V
Nº de salidas analógicas	-
Frecuencia máx. PWM	62.5 KHz

**Tabla 12.1** – Características Arduino Uno Rev 3 [16]

Es importante destacar que la configuración de los pines de entrada/salida digital es programable por código. Cada uno de estos pines tiene un número asignado y una funcionalidad determinada. Por ejemplo para este modelo la funcionalidades de los diferentes pines son:

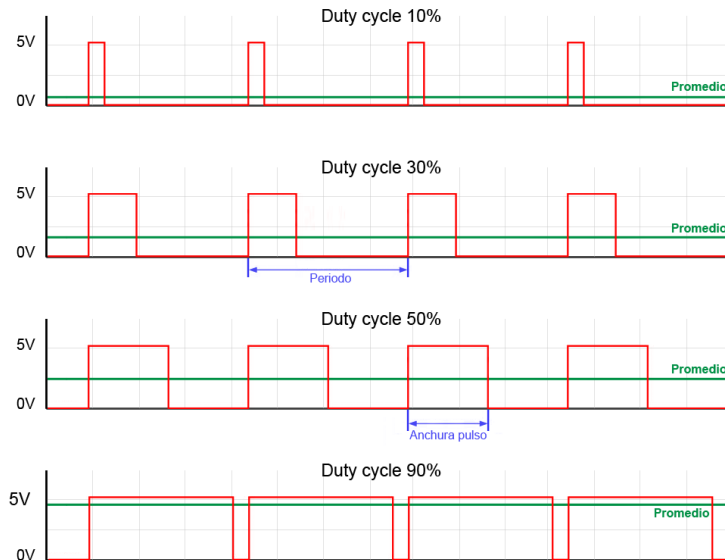
- Pines 0 y 1: pines TX y RX para comunicación serie.
- Pines 2 y 3: pines programables como interrupciones.
- Pines 3, 5, 6, 9, 10 y 11: Pines con salida PWM.
- Pines 10, 11, 12 y 13: Pines para comunicación SPI.

En referencia a las interrupciones, Arduino implementa los pines 2 y 3, de tal forma que si ocurre el evento configurado en estos pines, el programa pausa el flujo normal del programa y “salta” a ejecutar la función asociada a esa interrupción (ISR). Una vez ejecutada la rutina ISR, el procesador retoma el flujo normal de ejecución del programa en el punto donde había sido interrumpido.

Para este modelo de microcontrolador, los eventos de ambos pines pueden ser configurados por software. Estos eventos pueden asociarse a: flancos de subida, flancos de baja, estado alto, estado bajo o cambios de estado.

Por otro lado, se puede observar, Tabla 12.1, como el Arduino no presenta pines de salida analógica, por lo que, frecuentemente, se utilizan los pines digitales con modulación por ancho de pulso (PWM) para simular una tensión analógica.

Arduino genera una señal PWM que oscila entre valores de 0 y 5 V, y para controlar el ciclo de trabajo emplea un registro de 8 bits, con valores de 0 a 255 (al aumentar el valor de este registro, el ciclo de trabajo será mayor).



**Figura 12.1 – Señal PWM [48]**

Para obtener el valor medio de la señal de salida se emplea la siguiente fórmula.

$$V_{medio} = \frac{\text{Ciclo de trabajo}}{100}(V_{+} - V_{-}) \quad (12.1)$$

Otra característica muy a tener en cuenta a la hora de trabajar con la señal PWM es la frecuencia de la misma. Para generar estas señales Arduino Uno utiliza tres timers diferentes que pueden alcanzar valores máximos de frecuencia de 62,5 KHz (Timer 0) o de 31,37 KHz (Timer 1 y 2). No obstante, la frecuencia de estos timers se puede variar y ajustar, ya que cada uno de ellos, tiene asociados 2 registros en los que se puede modificar su valor así como el preescaler. Cada uno de estos Timers controla dos pines digitales.

- Timer0 para el control PWM de pines 5 y 6 (máx frecuencia: 62.5 kHz y preescalers de 1, 8, 64, 256 y 1024).
- Timer1 para el control PWM de pines 9 y 10 (máx frecuencia: 31.37 kHz y preescalers de 1, 8, 64, 256 y 1024).
- Timer2 para el control PWM de pines 3 y 11 (máx frecuencia: 31.37 kHz y preescalers de 1, 8, 32, 64, 128, 256 y 1024).

Por defecto, Arduino Uno emplea una frecuencia de 980 Hz para los pines 5 y 6, y una frecuencia de 490 Hz para el resto de pines PWM, por lo que, en caso de necesitar mayores frecuencias, será necesario modificar el preescaler.

Además, otra característica de esta placa, es que ofrece también dos pines de alimentación, uno a 5V y otro a 3.3V, con los que se pueden alimentar pequeños dispositivos con un consumo relativamente bajo de corriente.

## 12.2. Diseño y análisis del algoritmo de adaptación de la señal del codificador de velocidad

Para proceder a explicar la programación del código de adaptación de la señal de salida del codificador magnético (tren de pulsos) nos apoyaremos en el esquema de la Figura 8.17 presentado en el apartado 8.5.1.

El código empleado se puede dividir en varias etapas.

- Inicialmente se ejecuta un setup en el que se configuran diferentes parámetros como:
  - **Configuración de los pines de interrupción:** estos pines de interrupción son configurados como entradas y además, como recomienda el fabricante del sensor, para una correcta lectura del tren de pulsos, a estas entradas se les añade la resistencia Pull-Up que incluye los pines de entrada de Arduino.
  - **Configuración de las rutinas de interrupción:** además de configurar los pines de entrada, es imprescindible configurar las rutinas de interrupción. Para ello, se emplea la función *attachInterrupt* con la que indicamos el pin de interrupción que se emplea, el nombre de la función asociada a la interrupción y el evento que tiene que suceder para que se ejecute la ISR. Para el presente proyecto, se empleará el modo *Change* con el que se ejecuta la interrupción ante un cambio de valor de la señal del pin de entrada. También es importante destacar el uso de la función *digitalPinToInterrupt*, con la que se convierte un pin a la interrupción equivalente.
  - **Configuración de la frecuencia de salida de la señal PWM [22]:** otro aspecto a tener en cuenta en la configuración es el ajuste de frecuencia de la señal PWM generada. Para este proyecto, interesa generar una señal con una frecuencia alta, ya que, de esta manera, y a consecuencia de la necesidad de emplear un filtro para obtener únicamente el valor analógico de la señal modulada, el valor de los componentes se reducen y se facilita el filtrado de la señal. Como ya se explicó con anterioridad, la frecuencia máxima que se puede generar es de 62.5 kHz empleando el Timer0. No obstante, para el presente trabajo, no se podrá emplear este timer ya que se utiliza la función *millis()* que también emplea este timer por lo que podrían producirse incompatibilidades. Debido a ello, se empleará el Timer1, con el que se puede obtener una frecuencia máxima de 31,37 kHz. Para poder generar esta frecuencia se debe de configurar el registro que contiene los bits del preescaler de este temporizador, ya que por defecto el Arduino aplica un preescaler de 64.  
En este caso, se deberá de modificar los 3 primeros bits del registro *TCCR1B* (bits de preescaler para el Timer1). Para el proyecto se utilizará un preescaler unitario, situando el código *001* en los citados pines del registro.

- Una vez ejecutado el setup de configuración, se procede a ejecutar el programa principal.

Este algoritmo se ejecuta cada tiempo determinado por la variable *t\_muestreo*.



Para comprobar el tiempo entre cada ejecución se utiliza la función *millis()* que indica los milisegundos que transcurren desde que el Arduino se enciende.

Mientras que el tiempo transcurrido es menor al tiempo indicado en la variable *t\_muestreo*, el programa principal no ejecutará ninguna acción y sólo se podrán ejecutar las interrupciones asociadas a los pines 2 y 3 en las que se incrementará la variable *contador* con la que se contarán los flancos de subida y de bajada de las dos señales de salida del codificador. Una vez el tiempo transcurrido entre las muestras sea mayor o igual del valor indicado en la variable *t\_muestreo*, se ejecutará el resto del programa principal. Este algoritmo principal está compuesto por 4 partes fundamentales:

- Cálculo de la velocidad, en función de la resolución del codificador y del tiempo de muestreo, a partir del valor del contador.
- Acondicionamiento del valor de velocidad calculado a valores de ciclo de trabajo de la señal PWM (0/255).
- Cálculo promedio de los últimos valores de ciclo de trabajo. Para ello se utilizan 2 bucles *for*, con el primero se introduce el valor actual de ciclo de trabajo calculado, desplazando los anteriores una posición, mientras que con el segundo se suman estos valores para, seguidamente, dividirlo por el número de muestras (dimensión del vector de valores), obteniendo así el valor promedio.

En este caso se comprobó empíricamente que el número de datos que obtenía un mejor resultado y ralentizaba menos el sistema era realizar el promedio de los últimos 8 valores.

- Generación de la señal PWM empleando para ello la función *analogWrite* que genera la señal modulada introduciéndole el valor del ciclo de trabajo (valor medio obtenido) y el pin de salida. Una vez generada la PWM se actualizan las variables *contador* y *tiempo\_anterior* para empezar un nuevo ciclo de ejecución.

Es importante destacar que, durante la ejecución del programa principal, las interrupciones se deshabilitan por medio de la función *noInterrupts* para que estas no puedan parar el flujo de ejecución del programa. No obstante, una vez finalizado el programa principal, se vuelven a habilitar por medio de la función *interrupts*.

En el código empleado en el proyecto, se empleará un tiempo de muestreo de 200 ms. Este valor se obtuvo empíricamente después de realizar varias pruebas de medición para distintos valores de tiempo, comprobando como este era el valor que presentaba una mejor relación entre el menor tiempo y menor error en la medida.

También es necesario destacar el empleo del cálculo del promedio de las últimas 4 medidas de ciclo de trabajo obtenidas. Esto se realiza con el objetivo de estabilizar la medida, ya que, debido a la naturaleza del propio sensor y del algoritmo realizado, es frecuente que se obtengan diferencias de un par de pulsos obtenidos en la variable contador, dependiendo en el momento que se habilitan/deshabilitan las interrupciones. Estas pequeñas variaciones afectan a la propia salida del sistema por lo que interesa reducirlas para estabilizarla.

## 12.3. Simulación de los circuitos electrónicos

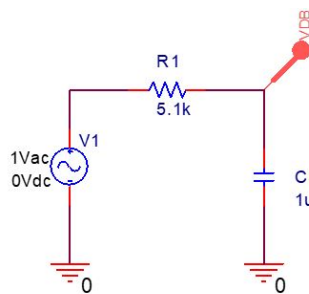
Para las simulaciones de los diferentes circuitos electrónicos del sistema se ha empleado el software Orcad Capture CIS.

### 12.3.1. Simulación del circuito de acondicionamiento del sensor

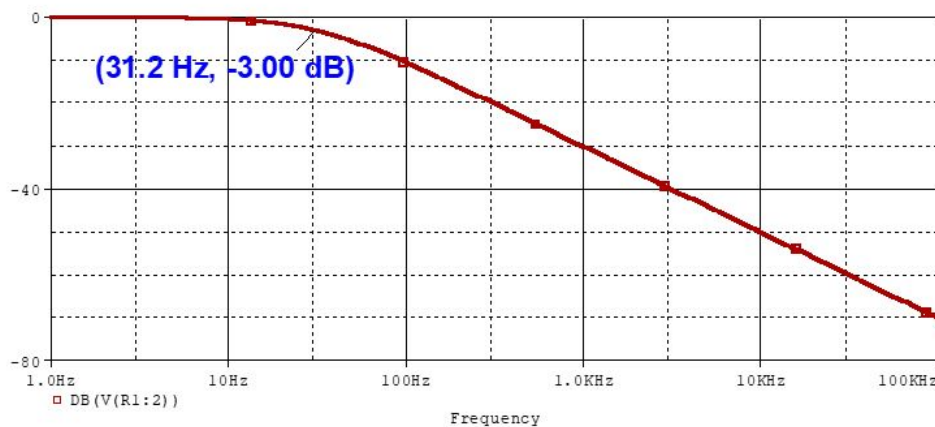
#### 12.3.1.1. Simulación del filtro pasivo paso bajo de primer orden

En cuanto a la simulación del filtro paso bajo, inicialmente se obtendrá el Bode de tensión para comprobar la frecuencia de corte del mismo (punto donde la ganancia cae 3 dB).

Para obtener el Bode, será necesario llevar a cabo una simulación *AC Sweep* empleando para ello una fuente *Vac* y un marcador de voltaje en decibelios.



**Figura 12.2** – Circuito simulación Bode filtro paso bajo

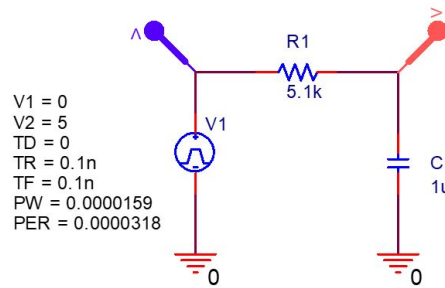


**Figura 12.3** – Bode de módulo del filtro paso bajo

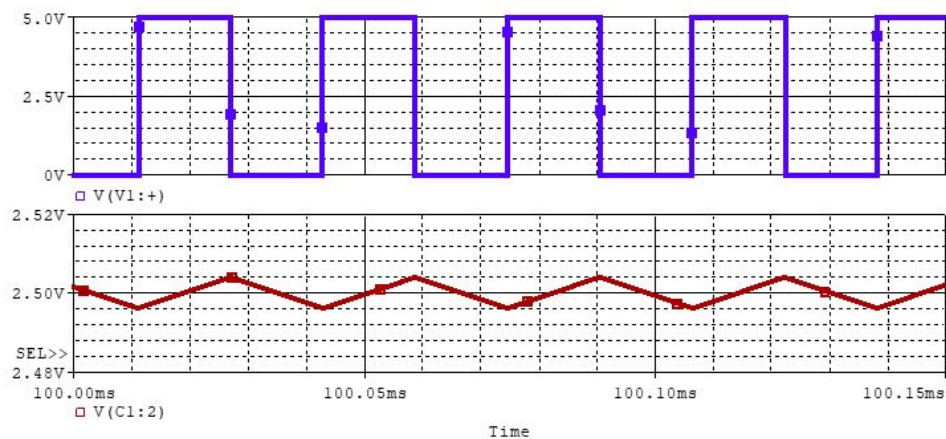
Como se puede observar en el Bode de módulo del filtro, Figura 12.3, la frecuencia de corte obtenida es de 31,2 Hz.

Además, para comprobar la correcta funcionalidad del filtro se realiza una simulación transitoria, *Time Domain*, con la que se puede comprobar la tensión de salida filtrada del circuito.

Para simular la señal PWM de salida del Arduino se emplea una fuente *V\_pulse*. En este caso se utilizará un ciclo de trabajo del 50 % por lo que la salida tendrá que tener un valor de 2,5V.



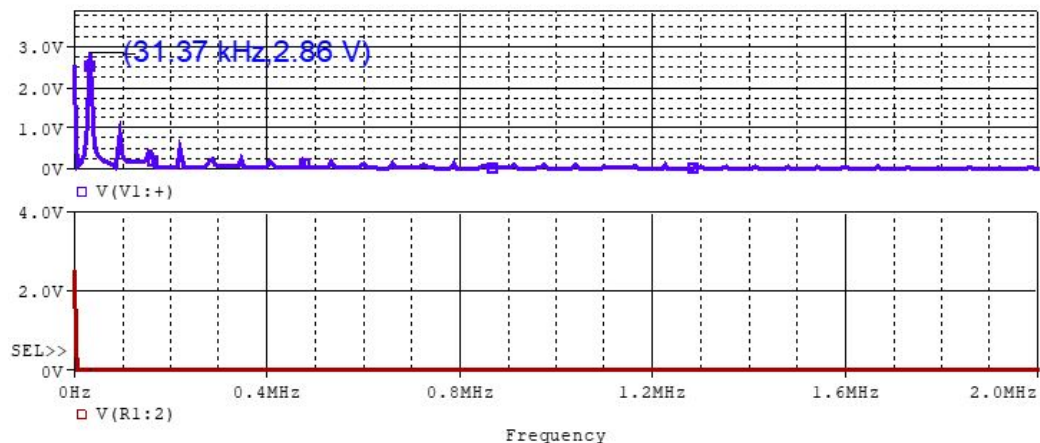
**Figura 12.4** – Circuito simulación análisis transitorio del filtro paso bajo



**Figura 12.5** – Gráfica de la señal de entrada y salida del filtro paso bajo

En la figura 12.5, se puede observar como la salida, en color rojo, tiene un pequeño rizado propio de las tensiones de salida de filtros. Para el presente proyecto, este rizado se asume válido ya que representa una variación de voltaje muy pequeña con respecto al rango del filtro 0/5V.

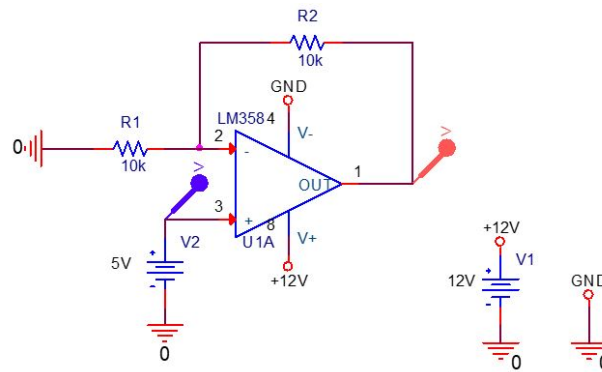
Analizando la transformada de Fourier de la señal de entrada y de salida, se puede comprobar como a la salida del filtro, únicamente se obtiene el valor en continua de la señal de entrada.



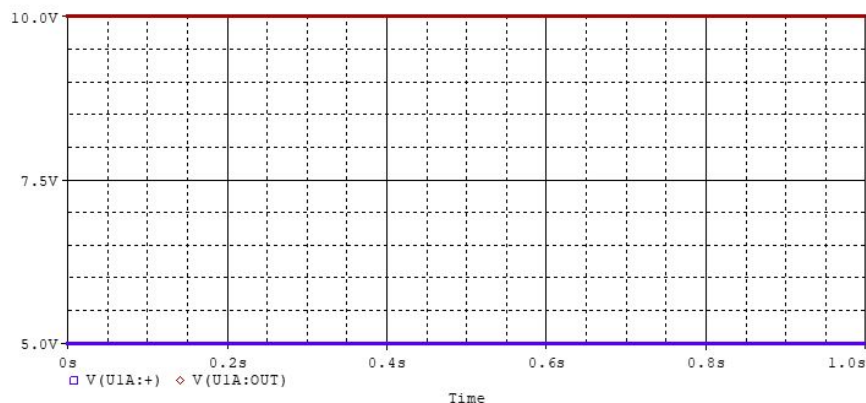
**Figura 12.6** – Gráfica de transformada de Fourier de la señal de entrada y salida del filtro paso bajo

### 12.3.1.2. Simulación del amplificador no inversor

En el caso del amplificador no inversor, se comprobará que la salida que se obtiene es del doble del valor de la entrada. Para ello se realizará un análisis transitorio, introduciéndole como señal de entrada un valor de 5V DC. De esta manera la salida obtenida tendrá que alcanzar un valor de 10V.



**Figura 12.7** – Circuito simulación análisis transitorio del amplificador no inversor

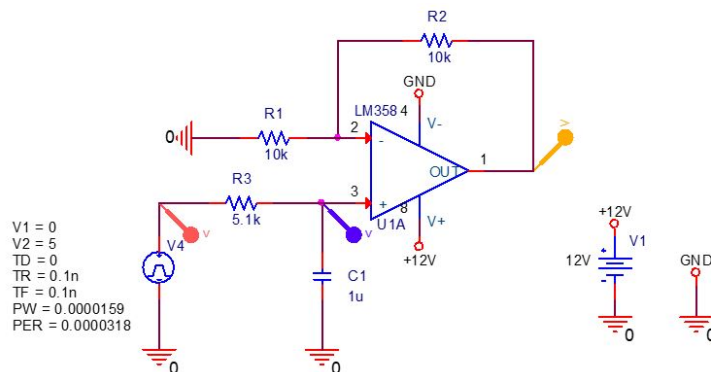


**Figura 12.8** – Gráfica de la señal de entrada y salida del circuito de amplificación

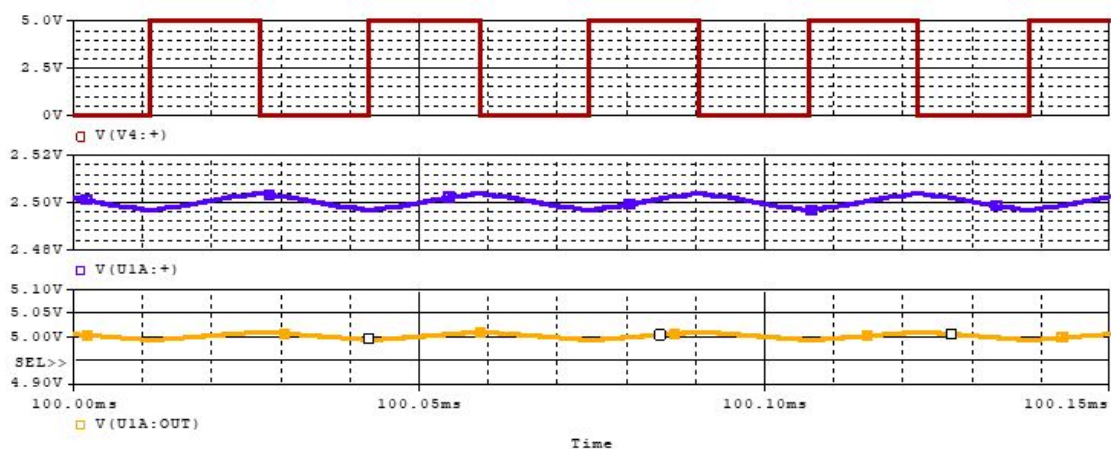
Como se puede observar en la figura 12.8, la señal de salida, en color rojo, es del doble del valor que la señal de entrada, en color azul.

### 12.3.1.3. Simulación del circuito de adaptación (filtrado+amplificación)

Realizadas las simulaciones del circuito de filtrado y de amplificación por separado, se comprobará su correcto diseño de forma conjunta. Para ello se realizará un análisis transitorio de la salida. Al igual que en el apartado 12.3.1.1, se empleará una señal PWM de 31,37 kHz con ciclo de trabajo de 50 % para simular la salida del microcontrolador Arduino.



**Figura 12.9 – Circuito simulación filtrado + amplificación**



**Figura 12.10 – Gráficas del circuito de simulación filtrado + amplificación**

Como se puede ver en la gráfica de la Figura 12.10, la tensión de salida del circuito, en color naranja, alcanza el doble del valor medio de la señal PWM de entrada.

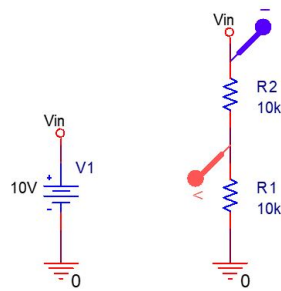
### 12.3.2. Simulación de los circuitos de acondicionamiento de las señales del DAQ

#### 12.3.2.1. Simulación del circuito de adaptación de la salida

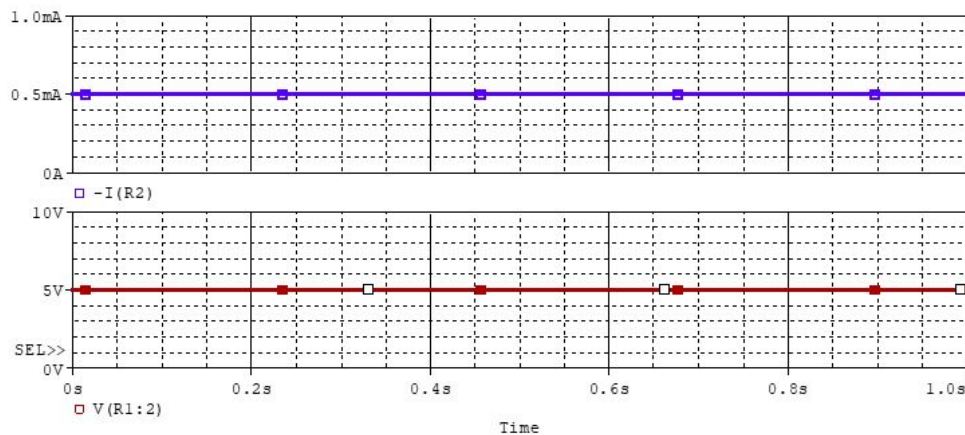
Al tratarse del mismo circuito que para el acondicionamiento de la salida del codificador, las simulaciones corresponden con las expuestas en el apartado 12.3.1.

#### 12.3.2.2. Simulación del circuito de adaptación de la entrada

Para el divisor de tensión se analizará tanto la tensión de salida como la corriente del mismo. Se empleará una fuente de entrada de 10V por lo que la salida deberá ser de 5V.



**Figura 12.11** – Circuito simulación divisor de tensión



**Figura 12.12** – Gráficas de la corriente y tensión de salida del divisor de tensión

Como se puede observar en las gráficas de la figura 12.12, la corriente del divisor es de 0,5 mA y la tensión obtenida a la salida es de la mitad del valor de la señal de entrada.

## 12.4. Parámetros de impresión 3D para la fabricación de las piezas que conforman el diseño

En este apartado se detallarán los diferentes parámetros de impresión utilizados para procesar cada pieza, los cuales se seleccionaron en base a obtener el mejor acabado y precisión posible, reduciendo el material y tiempo empleados. Además, para su configuración, se empleará el software Slic3r integrado en el programa de impresión 3D Repetier-Host.

**12.4.0.1. Soporte del imán del sensor (20 C.P.R.)**

Parámetros de impresión	
Tipo de material	PLA negro (1.75 mm)
Tiempo de impresión	9m:10s
Filamento necesario	579 mm
Peso aproximado	1.8 gr
Altura de capa	0.2 mm
Nº de capas de perímetro	3
Velocidad de impresión de perímetros	40 mm/s
Estructura y densidad de relleno	Triangular 20 %
Velocidad de impresión de relleno	60 mm/s
Material de soporte	No
Tipo de soporte	-
Umbral de voladizo para el soporte	-
Velocidad de impresión de soportes	-
Adherencia a la placa de impresión	Falda (2 bucles)
Tª de extrusión / cama caliente	210°C / 55°C

**Tabla 12.2** – Parámetros de impresión para la fabricación del soporte del imán del sensor**12.4.0.2. Carcasa del sistema de ventilación del motor y soporte del codificador**

Parámetros de impresión	
Tipo de material	PLA negro (1.75 mm)
Tiempo de impresión	10h:48m:14s
Filamento necesario	36455 mm
Peso aproximado	110 gr
Altura de capa	0.2 mm
Nº de capas de perímetro	3
Velocidad de impresión de perímetros	40 mm/s
Estructura y densidad de relleno	Triangular 20 %
Velocidad de impresión de relleno	60 mm/s
Material de soporte	No
Tipo de soporte	-
Umbral de voladizo para el soporte	-
Velocidad de impresión de soportes	-
Adherencia a la placa de impresión	Falda (2 bucles)
Tª de extrusión / cama caliente	210°C / 55°C

**Tabla 12.3** – Parámetros de impresión para la fabricación de la carcasa de ventilación del motor

**12.4.0.3. Soporte del conector 4 pines para la conexión del sensor**

Parámetros de impresión	
Tipo de material	PLA negro (1.75 mm)
Tiempo de impresión	1h:11m:7s
Filamento necesario	5213 mm
Peso aproximado (con material de soporte)	15,6 gr
Altura de capa	0.2 mm
Nº de capas de perímetro	3
Velocidad de impresión de perímetros	40 mm/s
Estructura y densidad de relleno	Triangular 20 %
Velocidad de impresión de relleno	60 mm/s
Material de soporte	Sí
Tipo de soporte	Pilares
Umbral de voladizo para el soporte	100 %
Velocidad de impresión de soportes	60 mm/s
Adherencia a la placa de impresión	Falda (2 bucles)
Tª de extrusión / cama caliente	210°C / 55°C

**Tabla 12.4** – Parámetros de impresión para la fabricación del soporte del conector 4 pines**12.4.0.4. Soporte de las tuercas para la fijación del soporte de conexión del motor**

Parámetros de impresión	
Tipo de material	PLA negro (1.75 mm)
Tiempo de impresión (por unidad)	7m:41s
Filamento necesario (por unidad)	459 mm
Peso aproximado	1.35 gr
Altura de capa	0.2 mm
Nº de capas de perímetro	3
Velocidad de impresión de perímetros	40 mm/s
Estructura y densidad de relleno	Triangular 20 %
Velocidad de impresión de relleno	60 mm/s
Material de soporte	No
Tipo de soporte	-
Umbral de voladizo para el soporte	-
Velocidad de impresión de soportes	-
Adherencia a la placa de impresión	Falda (2 bucles)
Tª de extrusión / cama caliente	210°C / 55°C

**Tabla 12.5** – Parámetros de impresión para la funda de la tuerca



**12.4.0.5. Caja para el sistema de adquisición de datos (DAQ)**

Parámetros de impresión	
Tipo de material	PLA negro (1.75 mm)
Tiempo de impresión	5h:44m:32s
Filamento necesario	21235 mm
Peso aproximado	64 gr
Altura de capa	0.2 mm
Nº de capas de perímetro	3
Velocidad de impresión de perímetros	40 mm/s
Estructura y densidad de relleno	Triangular 20 %
Velocidad de impresión de relleno	60 mm/s
Material de soporte	No
Tipo de soporte	-
Umbral de voladizo para el soporte	-
Velocidad de impresión de soportes	-
Adherencia a la placa de impresión	Falda (2 bucles)
Tª de extrusión / cama caliente	210°C / 55°C

**Tabla 12.6** – Parámetros de impresión para la caja DAQ**12.4.0.6. Tapa para la caja del sistema de adquisición de datos (DAQ)**

Parámetros de impresión	
Tipo de material	PLA negro (1.75 mm)
Tiempo de impresión	1h:32m:54s
Filamento necesario	7234 mm
Peso aproximado	21,6 gr
Altura de capa	0.2 mm
Nº de capas de perímetro	3
Velocidad de impresión de perímetros	40 mm/s
Estructura y densidad de relleno	Triangular 20 %
Velocidad de impresión de relleno	60 mm/s
Material de soporte	No
Tipo de soporte	-
Umbral de voladizo para el soporte	-
Velocidad de impresión de soportes	-
Adherencia a la placa de impresión	Falda (2 bucles)
Tª de extrusión / cama caliente	210°C / 55°C

**Tabla 12.7** – Parámetros de impresión para la tapa de la caja DAQ

**12.4.0.7. Caja general del proyecto**

Parámetros de impresión	
Tipo de material	PLA negro (1.75 mm)
Tiempo de impresión	20h:17m:58s
Filamento necesario	84775 mm
Peso aproximado	253 gr
Altura de capa	0.2 mm
Nº de capas de perímetro	3
Velocidad de impresión de perímetros	40 mm/s
Estructura y densidad de relleno	Triangular 20 %
Velocidad de impresión de relleno	60 mm/s
Material de soporte	No
Tipo de soporte	-
Umbral de voladizo para el soporte	-
Velocidad de impresión de soportes	-
Adherencia a la placa de impresión	Falda (2 bucles)
Tª de extrusión / cama caliente	210°C / 55°C

**Tabla 12.8** – Parámetros de impresión de la caja general**12.4.0.8. Tapa para la caja general del proyecto (soporte seta de emergencia)**

Parámetros de impresión	
Tipo de material	PLA negro (1.75 mm)
Tiempo de impresión	3h:53m:49s
Filamento necesario	19322 mm
Peso aproximado	58 gr
Altura de capa	0.2 mm
Nº de capas de perímetro	3
Velocidad de impresión de perímetros	40 mm/s
Estructura y densidad de relleno	Triangular 20 %
Velocidad de impresión de relleno	60 mm/s
Material de soporte	No
Tipo de soporte	-
Umbral de voladizo para el soporte	-
Velocidad de impresión de soportes	-
Adherencia a la placa de impresión	Falda (2 bucles)
Tª de extrusión / cama caliente	210°C / 55°C

**Tabla 12.9** – Parámetros de impresión para la tapa de la caja general

**12.4.0.9. Carcasa de protección de los contactos del variador de frecuencia**

Parámetros de impresión	
Tipo de material	PLA rojo (1.75 mm)
Tiempo de impresión	6h:47m:44s
Filamento necesario	31855 mm
Peso aproximado	95 gr
Altura de capa	0.2 mm
Nº de capas de perímetro	3
Velocidad de impresión de perímetros	40 mm/s
Estructura y densidad de relleno	Triangular 20 %
Velocidad de impresión de relleno	60 mm/s
Material de soporte	Sí
Tipo de soporte	Pilares
Umbral de voladizo para el soporte	100 %
Velocidad de impresión de soportes	60 mm/s
Adherencia a la placa de impresión	Falda (2 bucles)
Tª de extrusión / cama caliente	210°C / 55°C

**Tabla 12.10** – Parámetros de impresión para la carcasa de protección del variador de frecuencia**12.4.0.10. Carcasa de protección de los contactos del interruptor magnetotérmico**

Parámetros de impresión	
Tipo de material	PLA rojo (1.75 mm)
Tiempo de impresión	8h:26m:32s
Filamento necesario	36410 mm
Peso aproximado	108,6 gr
Altura de capa	0.2 mm
Nº de capas de perímetro	3
Velocidad de impresión de perímetros	40 mm/s
Estructura y densidad de relleno	Triangular 20 %
Velocidad de impresión de relleno	60 mm/s
Material de soporte	Sí
Tipo de soporte	Pilares
Umbral de voladizo para el soporte	100 %
Velocidad de impresión de soportes	60 mm/s
Adherencia a la placa de impresión	Falda (2 bucles)
Tª de extrusión / cama caliente	210°C / 55°C

**Tabla 12.11** – Parámetros de impresión para la carcasa de protección del interruptor magnetotérmico

## 12.5. Funciones de Arduino empleadas en el algoritmo de la DAQ

El algoritmo que emplea el Arduino DAQ (Apartado 12.6.1.2), utiliza las siguientes funciones de comunicación por puerto serie:

- **Serial.begin()** [23]: este comando sirve para iniciar la comunicación serie. Es importante destacar que el único argumento que se debe de introducir es la velocidad en baudios. En este caso, la comunicación se establece con una velocidad de 115200 baudios.
- **Serial.available()**[23]: con este comando se comprueba si la comunicación con el puerto serie está disponible y si hay datos disponibles para su lectura. Esta función devuelve como valor el número de bytes disponibles en el puerto serie.
- **Serial.read()** [23]: función con la que se leen datos de la entrada del puerto serie.
- **Serial.println()** [23]: comando para enviar datos por el puerto serie y añadir salto de línea.

Además de las funciones anteriormente expuestas, el algoritmo también utiliza otros comandos como pueden ser:

- **analogRead()** [23]: función que lee y digitaliza los valores de las entradas analógicas. El parámetro de entrada de esta función es el pin a leer. La resolución de la medida obtenida es de 10 bits (valores entre 0 y 1023).
- **analogWrite()** [23]: comando con el que se genera la señal PWM. Los parámetros de entrada de esta función son el pin de salida y el ciclo de trabajo.
- **bitSet()** [23]: para poner a 1 un bit de una variable. Debe de introducirse la variable y el bit que se quiere activar.
- **bitClear()** [23]: para poner a 0 un bit de una variable. Debe de introducirse la variable y el bit que se quiere desactivar.
- **bitRead()** [23]: para leer el valor de un bit. Al igual que las dos anteriores funciones, a esta se le debe de introducir la variable y el bit a leer.

## 12.6. Códigos de programación

### 12.6.1. Códigos de programación de Arduino UNO

#### 12.6.1.1. Código de programación para el Arduino del acondicionamiento de la señal del sensor

```
breakatwhitespace

//CODIGO EJECUCION ENCODER MAGNETICO POLOLU

const int int_pin_A = 2; //Interrupciones en arduino uno, pin 2 y pin 3
const int t_muestreo = 200;
const int max_velocidad = 1500; //ya que se realizarn pruebas con el motor en vacio
const int int_pin_B = 3;
unsigned long tiempo_anterior = 0;
volatile int contador = 0; // al ser una variable modificada dentro de
    interrupciones tiene que ser volatil
int velocidad;
float tension_salida, tension_actual, suma;
int dimension_vector=8;
float vector_tension[]={0,0,0,0,0,0,0,0};
const int pin_tension_salida = 9; //pin 9 sera el que de la se al pwm que sera
    filtrada

                                //se al PWM de este pin emplea el timer 1 (no se
                                emplea el timer 0 ya que es el que se usa
                                //la funcion millis(), delay()...)

void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    TCCR1B = TCCR1B & B11111000 | B00000001; // configuracion de los registros para
        obtener una frecuencia de PWM de 31372.55 Hz
                                // empleamos una frecuencia mas
                                elevada para asi emplear, en el
                                filtro que se colocara a la
                                // salida del pin de PWM, valores de
                                componentes mas pequenos.

    pinMode(int_pin_A, INPUT_PULLUP);
    pinMode(int_pin_B, INPUT_PULLUP);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(int_pin_A), interrupcion_A, CHANGE);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(int_pin_B), interrupcion_B, CHANGE);
}

void loop()
{
    if (millis() - tiempo_anterior >= t_muestreo) {
        noInterrupts();
        velocidad=contador*15;
        if (velocidad>max_velocidad){
            velocidad=max_velocidad;
        }
        //Correccion de posibles fallos de lectura;
        tension_actual=velocidad*0.17; //regla de 3 para mapear los datos
            (0.17=255/1500)
        //arduino gestiona el ciclo de trabajo de la se al PWM con valores entre 0 y
            255(100%)
    }
```

```
    for(int i=0; i<dimension_vector-1; i++){
        vector_tension[i]=vector_tension[i+1];
    }
    vector_tension[dimension_vector-1]=tension_actual;

    for(int i=0; i<dimension_vector; i++){
        suma=suma+vector_tension[i];
    }
    tension_salida=float(suma/dimension_vector);
    analogWrite(pin_tension_salida, tension_salida);
    contador = 0;
    suma=0;
    tiempo_anterior = millis();
    interrupts();
}

}

void interrupcion_B()
{
    contador++;
}
void interrupcion_A()
{
    contador++;
}
```

**Código 12.1:** Código para el Arduino de acondicionamiento de la señal de salida del codificador magnético

#### 12.6.1.2. Código de programación para el Arduino DAQ

```
breakatwhitespace
// Definicion de las constantes
int Canal_0_Generar = 3; // Definimos el pin del canal 0 para generacion
int Canal_1_Generar = 5; // Definimos el pin del canal 1 para generacion

int Canal_0_Adquirir = 0; // Definimos el pin del canal 0 para adquisicion
int Canal_1_Adquirir = 1; // Definimos el pin del canal 1 para adquisicion

// Configuracion del Arduino
void setup() {
    // Defino los pines de las se a les PWM como salida
    pinMode(Canal_0_Generar, OUTPUT); // Canal 0
    pinMode(Canal_1_Generar, OUTPUT); // Canal 1
}
```

```
// Definimos un nuevo preescaler para los temporizadores. Esto hara que la
    frecuencia de la se al PWM sea mas alta
bitClear(TCCR0B,CS02);
bitClear(TCCR0B,CS01);
bitSet(TCCR0B,CS00); // Entrada de reloj al contador sin preescaler (Frecuencia de
    62,50 kHz para los pines 5 y 6, Canal 1 y 2)
bitClear(TCCR1B,CS12);
bitClear(TCCR1B,CS11);
bitSet(TCCR1B,CS10); // Entrada de reloj al contador sin preescaler (Frecuencia de
    31,37 kHz para los pines 9 y 10, Canal 3 y 4)
bitClear(TCCR2B,CS22);
bitClear(TCCR2B,CS21);
bitSet(TCCR2B,CS20); // Entrada de reloj al contador sin preescaler (Frecuencia de
    31,37 kHz para los pines 3 y 11, Canal 1 y 5)

// Y se inicializa la comunicacion serie con el ordenador
Serial.begin(115200); // La velocidad tiene que ser la misma tanto en el Arduino
    como en MatLab
}

// Programa principal del Arduino
void loop() {
    // Definimos las variables necesarias
    int Comando=0; // Valor inicial para el comando 0
    int Dato=0; // Valor inicial para el Dato 0

    // Primero esperaremos a que se reciba alg n byte por el puerto serie
    if (Serial.available()>0){
        // Leemos el valor recibido
        Comando=Serial.read();
        // Comprobamos si lo que queremos es hacer una Generacion, y procesamos cada
            bloque de canales por separado
        if (bitRead(Comando,6)==1) { // Generar una se al PWM
            // Comprobamos el numero de canales a generar, y los procesamos
            switch (Comando&0x07) {
                case 0: // Generar se al por Canal 0
                    while (Serial.available()<=0);
                    Dato=Serial.read(); // Recibimos el dato correspondiente al Canal 0
                    analogWrite(Canal_0.Generar,Dato); // Generamos la se al PWM con el valor
                        recibido
                    break;
                case 1: // Generar se al por Canal 0 y Canal 1
                    while (Serial.available()<=0);
                    Dato=Serial.read(); // Recibimos el dato correspondiente al Canal 0
                    analogWrite(Canal_0.Generar,Dato); // Generamos la se al PWM con el valor
                        recibido
                    while (Serial.available()<=0);
                    Dato=Serial.read(); // Recibimos el dato correspondiente al Canal 1
                    analogWrite(Canal_1.Generar,Dato); // Generamos la se al PWM con el valor
                        recibido
```

```

        break;
    }
}

if (bitRead(Comando,7)==1) { // Adquisición de la se al
    switch ((Comando>>3)&0x07) {
        case 0: // Adquirir se al por Canal 0
            Dato=analogRead(Canal_0_Adquirir); // Adquirimos la se al analógica
            presente en el Canal 0
            Dato=Dato>>2; // Desplazamos el valor para quedarnos con los 8 bits mas
            significativos
            Serial.println(lowByte(Dato));
            break;
        case 1: // Adquirir se al por Canal 0 y Canal 1
            Dato=analogRead(Canal_0_Adquirir); // Adquirimos la se al analógica
            presente en el Canal 0
            Dato=Dato>>2; // Desplazamos el valor para quedarnos con los 8 bits mas
            significativos
            Serial.println(lowByte(Dato));
            Dato=analogRead(Canal_1_Adquirir); // Adquirimos la se al analógica
            presente en el Canal 1
            Dato=Dato>>2; // Desplazamos el valor para quedarnos con los 8 bits mas
            significativos
            Serial.println(lowByte(Dato));
            break;
        }
    }
}

// Además, si no se recibe ningún byte, no se hace nada; solo esperar
}

```

**Código 12.2:** Código para el empleo del microcontrolador Arduino como DAQ

## 12.6.2. Códigos de programación de Matlab

### 12.6.2.1. DAQ\_Start

```

function []=DAQ_Start()
% This function configures the DAQ input and output

global Arduino_COM
if ~isempty(Arduino_COM)
    DAQ_Stop %Ensure the communication is ended before establish a new communication
end

% The COM number depends on each system; it is necessary to confirm in the
% "Devices administrator"

```



```

Arduino_COM=serial('COM10','BaudRate',115200);

% We open the COM port to communicate with Arduino
fopen(Arduino_COM);
pause(2) %ensure the communication has enough time to be established succesfully
end

```

Código 12.3: DAQ\_Start

### 12.6.2.2. DAQ\_Stop

```

function []=DAQ_Stop()
% This function is used to finaliced the uses of the DAQ

global Arduino_COM
if ~isempty(Arduino_COM)
    if isvalid(Arduino_COM) %Only when communication is stablished,
        %it stop the communication
        % Clear the outputs channels
        DAQ_Write(0,0); % Ensure the output channels are resetted

        % The COM port is closed
        fclose(Arduino_COM);

        % The variable of the DAQ is deleted
        delete(Arduino_COM);
    end
end
end
end

```

Código 12.4: DAQ\_Stop

### 12.6.2.3. DAQ\_Read

```

function [Channel_0,Channel_1]=DAQ_Read()
% This function read the value in the configured input in the DAQ

global Arduino_COM

Comando=uint8(136); % We command the Arduino to send the values of the
% first two input channels

fwrite(Arduino_COM,Comando,'uchar');

Channel_0=fscanf(Arduino_COM,'%d');

```

```
% Arduino reading range is 0@1023, them the measure is scaled to 0@100
Channel_0=100*Channel_0/255;
Channel_1=fscanf(Arduino_COM, '%d');
% Arduino reading range is 0@1023, them the measure is scaled to 0@100
Channel_1=100*Channel_1/255;

end
```

**Código 12.5: DAQ\_Read**

#### 12.6.2.4. DAQ\_Write

```
function []=DAQ_Write(Channel_0,Channel_1)
% This function write de desired value in the configured DAQ output

global Arduino_COM

% Ensure that the value is inside the operation range
if Channel_0>100
    Channel_0=100;
elseif Channel_0<0
    Channel_0=0;
end
if Channel_1>100
    Channel_1=100;
elseif Channel_1<0
    Channel_1=0;
end

% As the range of the values is 0@100, the values are scaled to 0@255
Channel_0=round(255*Channel_0/100);
Channel_1=round(255*Channel_1/100);

% Once the values are in the correct scale, they are "sent" to the DAQ

Comando=uint8(65); % We command the Arduino to send the values of the first
% two input channels

fwrite(Arduino_COM,Comando, 'uchar');
fwrite(Arduino_COM,Channel_0, 'uchar');
fwrite(Arduino_COM,Channel_1, 'uchar');

end
```

**Código 12.6: DAQ\_Write**

### 12.6.2.5. Relay-Feedback

```

function RELAY_FEEDBACK(margen, velocidad.consigna, t_muestreo)
%inicio de la comunicacion
DAQ_Start;
DAQ_Write(0,0);
%valores iniciales
x=0;
n=1;
t=0;
while x==0
    tic;
    vel=DAQ_Read; %lectura velocidad
    velocidad.instante=vel*15; %adaptacion velocidad
    %actualizacion de variables
    velocidad(n)=velocidad.instante;
    tiempo(n)=t*t_muestreo;
    n=n+1;
    t=t+1;
    %tecla de paro
    tecla=get(gcf, 'currentcharacter');
    if tecla=='a'
        DAQ_Write(0,0);
        DAQ_Stop;
        %hold off;
        %close all;
        break
    end
    %regulacion de la senal de control
    if velocidad.instante>velocidad.consigna+margen
        DAQ_Write(0,0);
    end
    if velocidad.instante<velocidad.consigna-margen
        DAQ_Write(100,0);
    end
    %graficado de datos
    plot(tiempo, velocidad, 'b');
    xlabel('Tiempo transcurrido (segundos)');
    ylabel('Velocidad (r.p.m.)');
    hold on;
    pause(t_muestreo-toc);
end

```

**Código 12.7:** Función *Relay-Feedback*

### 12.6.2.6. Función *graficar*

```

function graficar(tiempo,e,u,r,y,modo)
    yyaxis left
    plot(tiempo,u, 'g-');
    ylabel('Senal de control (%)');
    ylim([0 100]);
    yyaxis right
    plot(tiempo,y,'k-',tiempo,r,'b-',tiempo,e, 'r-');
    xlabel('Tiempo transcurrido (segundos)');
    ylabel('Velocidad (r.p.m.)');
    ylim([0 1500]);
    legend('Potencia motor (%)','Velocidad sistema (r.p.m.)','Set point (r.p.m.)',
        'Error absoluto (r.p.m.)');

    if modo==1
        title('Regulador PID');
    elseif modo==2
        title('Regulador PI');
    else
        title('Regulador P');
    end
end

```

Código 12.8: Función *graficar*

#### 12.6.2.7. Función *calculocoeficientes*

```

function [C1 C2 C3]=calculocoeficientes(Ti,Td,Ts,N)
    C1=Ts/(2*Ti);
    C2=(2*Td)/((2*Td/N)+Ts);
    C3=((2*Td/N)-Ts)/((2*Td/N)+Ts);

```

Código 12.9: Función *calculocoeficientes*

#### 12.6.2.8. Algoritmo de control PID

```

function ALGORITMO_CONTROL(setpoint,Ts,Kp,Td,Ti,N)

%valores iniciales de las variables de trabajo
x=0;
k=0;
t=0;

%seleccion del tipo de regulador
modo=menu('Elija el tipo de regulador que quiere aplicar','PID','PI','P');

%inicio de la comunicacion Matlab-DAQ

```

```

DAQ_Start;
DAQ_Write(0,0);
%calculo de los coeficientes
[C1 C2 C3]=calculo_coeficientes(Ti,Td,Ts,N)
%bucle de ejecucion
while x==0
    tic; %inicio temporizador (tiempo de ejecucion)
    %se para el sistema y se cierra el puerto de comunicacion al presionar
    %la tecla 'a'
    tecla=get(gcf,'currentcharacter');
    if tecla=='a'
        DAQ_Write(0,0);
        DAQ_Stop;
        hold off;
        close all;
        break;
    end
    %actualizacion de variables
    k=k+1;
    tiempo(k)=t*Ts;
    t=t+1;
    %lectura de la velocidad del sistema
    velocidad=DAQ_Read;
    setpoint_aux=setpoint/15.0; % pasar a porcentaje
    r(k)=setpoint_aux;
    y(k)=velocidad;
    if modo==1
        %modo 1 seria regulador PID.....
        if k==1 %primer ciclo
            e(k)=r(k)-y(k);
            i(k)=C1*e(k);
            d(k)=C2*e(k);
            u(k)=Kp*(e(k)+i(k)+d(k));
        else %resto de ciclos
            e(k)=r(k)-y(k);
            i(k)=C1*(e(k)+e(k-1))+i(k-1);
            d(k)=C2*(e(k)-e(k-1))+C3*d(k-1);
            u(k)=Kp*(e(k)+i(k)+d(k));
        end
    elseif modo==2
        %modo 2 seria regulador PI.....

        if k==1 %primer ciclo
            e(k)=r(k)-y(k);
            i(k)=C1*e(k);
            u(k)=Kp*(e(k)+i(k));
        else %resto de ciclos
            e(k)=r(k)-y(k);
            i(k)=C1*(e(k)+e(k-1))+i(k-1);
            u(k)=Kp*(e(k)+i(k));
        end
    end
end

```

```

        end
    else
        %modo 3 seria regulador P.....

        if k==1 %primer ciclo
            e(k)=r(k)-y(k);
            u(k)=Kp*(e(k));
        else %resto de ciclos
            e(k)=r(k)-y(k);
            u(k)=Kp*(e(k));
        end
    end
end

if u(k)>100 %limitacion de la senal de control
    u(k)=100;
end
velocidadmotor=u(k);
DAQ_Write(velocidadmotor,0);

if e(k)<0 %obtencion del valor absoluto del error para graficar
    e_abs(k)=abs(e(k));
else
    e_abs(k)=e(k);
end

%graficar resultados
error_grafica(k)=e_abs(k)*15.0;
setpoint_grafica(k)=setpoint;
velocidad_grafica(k)=velocidad*15.0;
graficar(tiempo,error_grafica,u,setpoint_grafica,velocidad_grafica,modo);
pause(Ts-toc);

end

```

Código 12.10: Función *Algoritmo\_Control*

### 12.6.2.9. Algoritmo de control PID (modificado)

```

function ALGORITMO_CONTROL_VECTOR(setpoint,Ts,Kp,Td,Ti,N)

%valores iniciales de las variables de trabajo
x=0;
k=0;
t=0;

%seleccion del tipo de regulador
modo=menu('Elija el tipo de regulador que quiere aplicar','PID','PI','P');
%inicio de la comunicacion Matlab-DAQ
DAQ_Start;
DAQ_Write(0,0);

```

```

%calculo de los coeficientes
[C1 C2 C3]=calculocoeficientes(Ti,Td,Ts,N)
%bucle de ejecucion
while x==0
    tic; %inicio temporizador (tiempo de ejecucion)
    %dimension del vector de setpoint
    contador=length(setpoint);
    %paro del sistema cuando el vector del setpoint finaliza
    if k==contador
        DAQ_Write(0,0);
        DAQ_Stop;
        hold off;
        break;
    end
    %se para el sistema y se cierra el puerto de comunicacion al presionar
    %la tecla 'a'
    tecla=get(gcf,'currentcharacter');
    if tecla=='a'
        DAQ_Write(0,0);
        DAQ_Stop;
        hold off;
        close all;
        break;
    end
    %actualizacion de variables
    k=k+1;
    tiempo(k)=t*Ts;
    t=t+1;
    %lectura de la velocidad del sistema
    velocidad=DAQ_Read;
    r(k)=setpoint(k)/15.0;
    y(k)=velocidad;
    if modo==1
        %modo 1 seria regulador PID.....
        if k==1 %primer ciclo
            e(k)=r(k)-y(k);
            i(k)=C1*e(k);
            d(k)=C2*e(k);
            u(k)=Kp*(e(k)+i(k)+d(k));
        else %resto de ciclos
            e(k)=r(k)-y(k);
            i(k)=C1*(e(k)+e(k-1))+i(k-1);
            d(k)=C2*(e(k)-e(k-1))+C3*d(k-1);
            u(k)=Kp*(e(k)+i(k)+d(k));
        end
    elseif modo==2
        %modo 2 seria regulador PI.....

        if k==1 %primer ciclo
            e(k)=r(k)-y(k);

```

```

        i(k)=C1*e(k);
        u(k)=Kp*(e(k)+i(k));
    else %resto de ciclos
        e(k)=r(k)-y(k);
        i(k)=C1*(e(k)+e(k-1))+i(k-1);
        u(k)=Kp*(e(k)+i(k));
    end
else
    %modo 3 seria regulador P.....

    if k==1 %primer ciclo
        e(k)=r(k)-y(k);
        u(k)=Kp*(e(k));
    else %resto de ciclos
        e(k)=r(k)-y(k);
        u(k)=Kp*(e(k));
    end
end

if u(k)>100 %limitacion de la senal de control
    u(k)=100;
end
velocidadmotor=u(k);
DAQ_Write(velocidadmotor,0);

if e(k)<0 %obtencion del valor absoluto del error para graficar
    e_abs(k)=abs(e(k));
else
    e_abs(k)=e(k);
end
error_grafica(k)=e_abs(k)*15.0;
setpoint_grafica(k)=setpoint(k);
velocidad_grafica(k)=velocidad*15.0;
graficar(tiempo,error_grafica,u,setpoint_grafica,velocidad_grafica,modo);
pause(Ts-toc);

end

```

Código 12.11: Función *Algoritmo\_Control\_Vector*

## 12.7. Manual de Usuario de la tarjeta de adquisición de datos (Arduino como DAQ)

Una parte fundamental del presente proyecto será establecer la correcta comunicación entre el banco de pruebas diseñado y el software Matlab con el que se monitoriza y controla el sistema. De esta manera se presenta la siguiente Guía de Usuario en la que se explicará los pasos necesarios para establecer la comunicación entre el PC y el sistema, es decir, entre el



Arduino DAQ y el software Matlab.

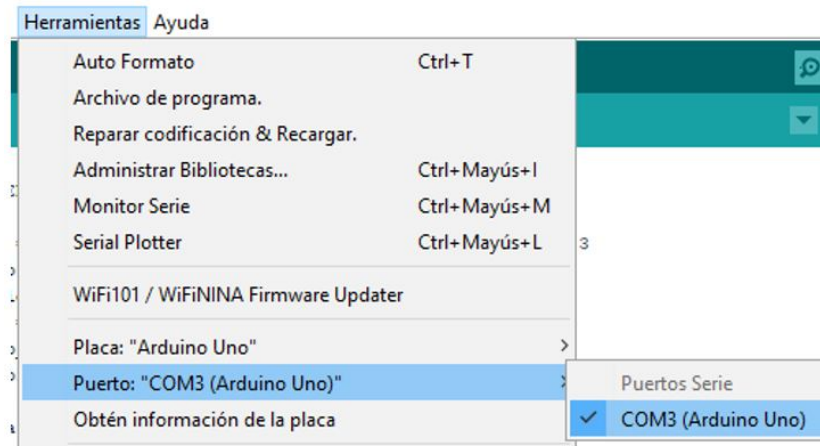
Para establecer dicha comunicación entre el sistema y Matlab será imprescindible conocer la funciones DAQ, ejecutables desde Matlab, de las que se parte y que simplificarán la transferencia de datos entre Matlab y Arduino.

Las funciones DAQ de las que se disponen son:

- **DAQ\_Start**: esta función es la encargada de iniciar el puerto de comunicación serie entre Arduino y Matlab. Dentro de esta función es indispensable indicar el número de puerto de conexión de la placa Arduino y la velocidad de comunicación.
- **DAQ\_Stop**: es la encargada de finalizar la comunicación, situando las variables de salida a estado de reposo y cerrando el puerto serie.
- **DAQ\_Read**: función empleada para solicitar la lectura de los datos de entrada en el Arduino. Recibidos estos datos, se escalan a valores porcentuales entre 0 y 100 %.
- **DAQ\_Write**: comando utilizado para la escritura y envío de datos al Arduino. Esta función dispone de dos canales de escritura, el primero para el canal 0 y el siguiente para el canal 1, es decir, *DAQ\_Write(canal 0, canal 1)*, y los datos de escritura que se admiten corresponden con valores porcentuales entre 0 y 100 % que se utilizarán para controlar el ciclo de trabajo de la señal PWM de salida del DAQ.

Una vez presentadas las funciones de comunicación se exponen los pasos necesarios para establecer la citada comunicación Matlab-Arduino.

1. En primer lugar es necesario conectar por medio del cable USB el ordenador con el microcontrolador Arduino que realice las funciones de DAQ.
2. Una vez conectado el ordenador con la tarjeta de Adquisición de datos (Arduino), es necesario identificar el número de puerto serie asignado a esa configuración. Para poder identificarlo se pueden llevar a cabo 2 operaciones:
  - a) Identificación del puerto serie por medio del software Arduino IDE. Para ello, es necesario acceder a la opción *Puerto* dentro del menú *Herramientas*, en donde se reflejará el número de puerto serie asignado a la comunicación.



**Figura 12.13** – Identificación del puerto serie con Arduino IDE

- b) Identificación del puerto serie por medio del software Matlab ejecutando el comando *seriallist*, función que devuelve el puerto serie conectado.

```
>> puerto=seriallist  
  
puerto =  
  
"COM3"
```

**Figura 12.14** – Identificación del puerto serie con Matlab

3. Conocido el puerto asignado a la comunicación, se procederá a cargar las funciones DAQ, anteriormente explicadas, en el *Path* de Matlab. Para ello será necesario acceder a la casilla *Set Path* dentro del menú *Home* del programa. Seleccionada esta opción se abrirá una ventana en la que se tendrá que buscar la carpeta en donde se almacenan las funciones, por medio del botón *Add Folder*, y seleccionar dicha carpeta para posteriormente guardar los cambios realizados con la opción *Save*.
4. Añadidas las funciones al *Path* de Matlab será necesario modificar la función *DAQ.Start*, introduciendo el puerto serie que se asignó al Arduino (paso 2) y la velocidad de transmisión de datos, que debe ser la misma que la indicada en el algoritmo cargado en Arduino (Apartado 12.6.1.2). Para este sistema se utilizará una velocidad de 115200 baudios.

```
function []=DAQ_Start()
% This function configures the DAQ input and output

global Arduino_COM
if ~isempty(Arduino_COM)
    DAQ_Stop %Ensure the communication is ended before establish a new communication
end
% The COM number depends on each system; it is necessary to confirm in the
% "Devices administrator"
Arduino_COM=serial('COM10','BaudRate',115200);

% We open the COM port to communicate with Arduino
fopen(Arduino_COM);
pause(2) %ensure the communication has enough time to be established successfully
end
```

**Figura 12.15** – Configuración de los parámetros de comunicación

5. Modificada la función *DAQ\_Start* con los parámetros de velocidad y número de puerto asignado, ya se podrá establecer la comunicación.

Siempre que se quiera iniciar la conexión del puerto serie se deberá ejecutar en la *Command Window* la función *DAQ\_Start* con la que se inicializará la comunicación serie. En este momento ya se podrán ejecutar las funciones de recibo y envío de datos, es decir, *DAQ\_Read* y *DAQ\_Write*.

En el momento que se quiera finalizar la comunicación por puerto serie será necesario ejecutar la función *DAQ\_Stop*.

Es importante tener en cuenta que si se desconecta el Arduino antes de ejecutar la función *DAQ\_Stop* el puerto de comunicación quedará activado.



**TÍTULO: BANCO DE PRUEBAS PARA MONITORIZACIÓN Y CONTROL  
DE MOTOR TRIFÁSICO**

---

# **PLANOS**

---

**PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

**AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N**

**15405 - FERROL**

**FECHA: JUNIO DE 2020**

**AUTOR: EL ALUMNO**

**Fdo.: ÁLVARO MICHELENA GRANDÍO**

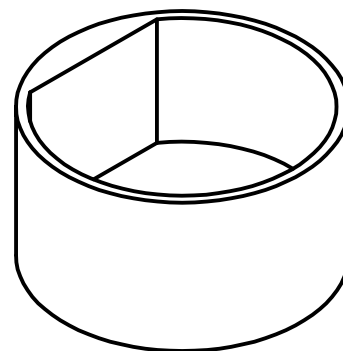
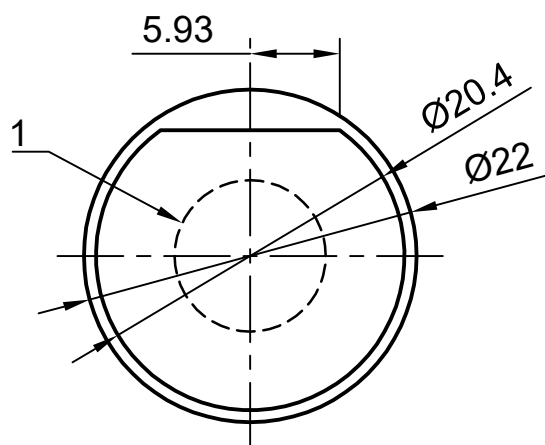
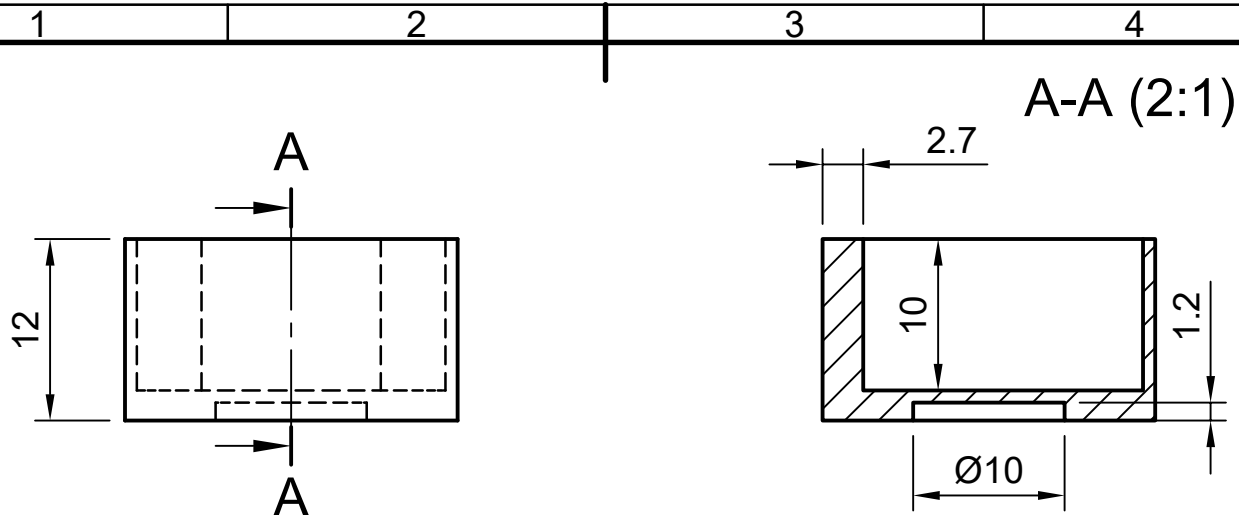


## Índice de planos

1	Soporte disco imantado 20 C.P.R. . . . .	179
2	Protector del ventilador del motor y soporte del codificador . . . . .	181
3	Soporte del conector del sensor . . . . .	183
4	Soporte tuerca para el acople del soporte de conexión del sensor . . . . .	185
5	Vista explosionada del soporte del sensor y conector . . . . .	187
6	Caja DAQ . . . . .	189
7	Tapa de la caja DAQ . . . . .	191
8	Vista explosionada de la caja DAQ . . . . .	193
9	Identificación de conectores caja DAQ . . . . .	195
10	Caja general del sistema . . . . .	197
11	Tapa de la caja general del sistema . . . . .	199
12	Vista explosionada de la caja general del sistema . . . . .	201
13	Identificación de conectores caja general . . . . .	203
14	Acople del eje del motor a discos de carga . . . . .	205
15	Discos de carga . . . . .	207
16	Vista explosionada del acople y las cargas del sistema . . . . .	209
17	Carcasa de protección de los contactos del variador de frecuencia . . . . .	211
18	Identificación de conectores de la carcasa del variador de frecuencia . . . . .	213
19	Carcasa de protección de los contactos del interruptor magnetotérmico . . . . .	215
20	Puerta de la caja de protección . . . . .	217
21	Parte fija delantera de la caja de protección . . . . .	219
22	Parte trasera de la caja de protección . . . . .	221
23	Lateral derecho de la caja de protección . . . . .	223
24	Lateral izquierdo de la caja de protección . . . . .	225
25	Tapa de la caja de protección . . . . .	227
26	Vista explosionada de la caja de protección . . . . .	229
27	Esquema general de conexión eléctrica de los módulos y dispositivos del sistema . . . . .	231
28	Esquema de conexión eléctrica del DAQ . . . . .	233
29	Esquema de conexión eléctrica de los dispositivos de la caja general del sistema . . . . .	235
30	Esquema eléctrico de la placa de acondicionamiento de las señales del DAQ . . . . .	237
31	Disposición de componentes de la placa de acondicionamiento de señales del DAQ . . . . .	239
32	Footprint de la placa de acondicionamiento de señales del DAQ . . . . .	241
33	Esquema eléctrico de la placa de acondicionamiento de la señal de velocidad . . . . .	243
34	Disposición de componentes de la placa de acondicionamiento de la señal de velocidad . . . . .	245
35	Footprint de la placa de acondicionamiento de la señal de velocidad . . . . .	247
36	Esquema eléctrico de la placa de bornes de alimentación de la caja general . . . . .	249

37 Disposición de componentes de la placa de bornes de alimentación de la caja general . . . . .	251
38 Footprint de la placa de bornes de alimentación de la caja general . . . . .	253





Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Disco de imanes



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Soporte a eje del disco imantado 20 C.P.R.

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 2:1

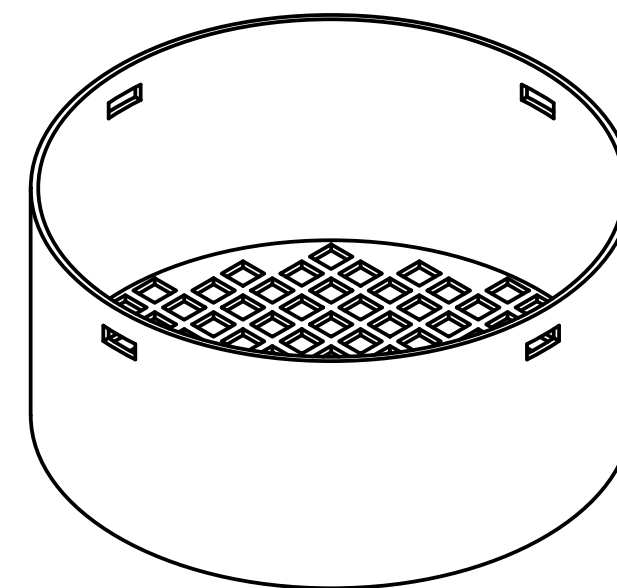
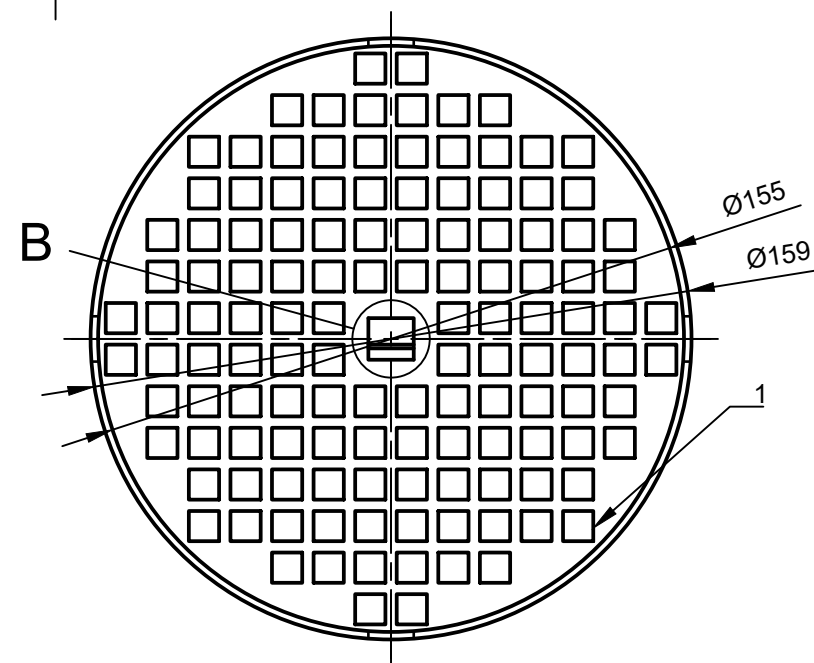
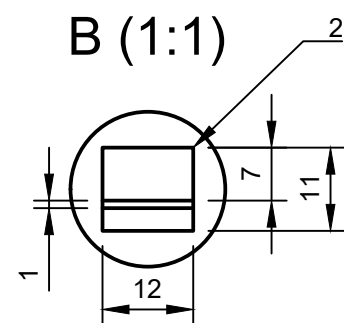
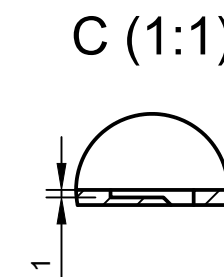
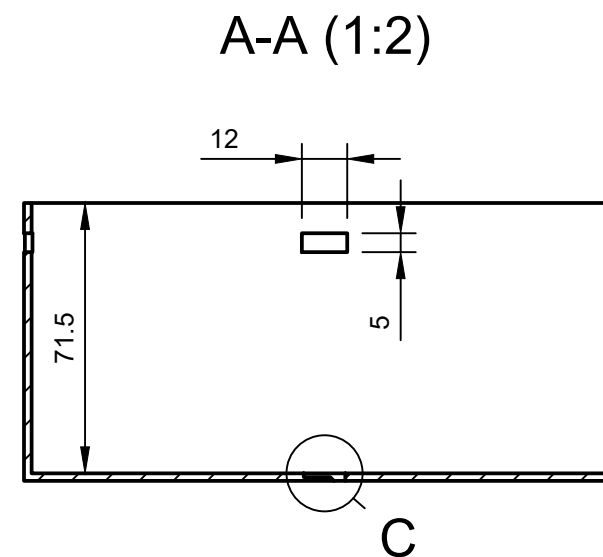
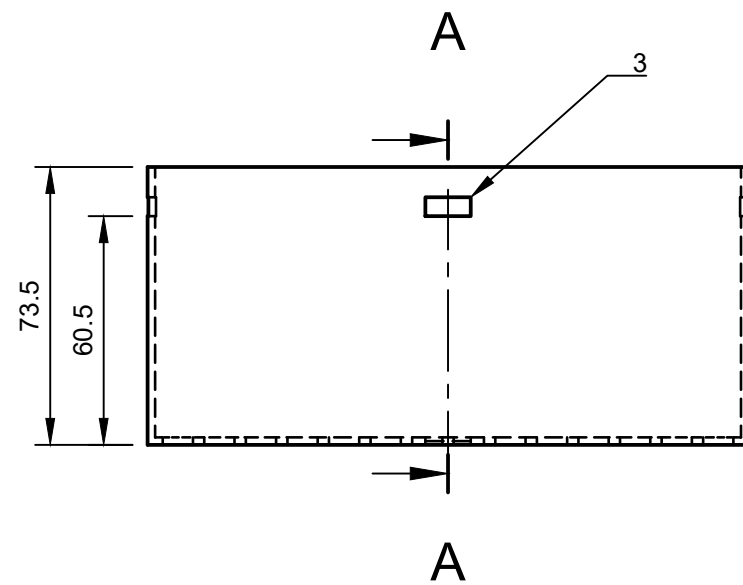
AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío

FIRMA:

PLANO Nº: 01





Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Entramado de ventilación (cuadrados 8x8 mm) con 3 mm de distancia entre ellos
2	Sensor magnético
3	Agujeros para la fijación de la carcasa al motor



UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG N°: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

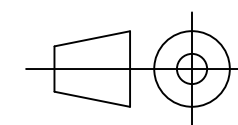
Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Protector del ventilador del motor (soporte sensor)

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío



FIRMA:

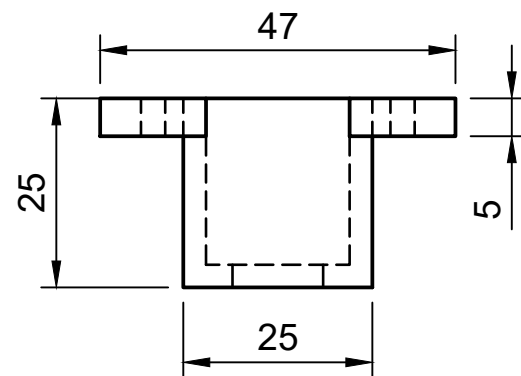
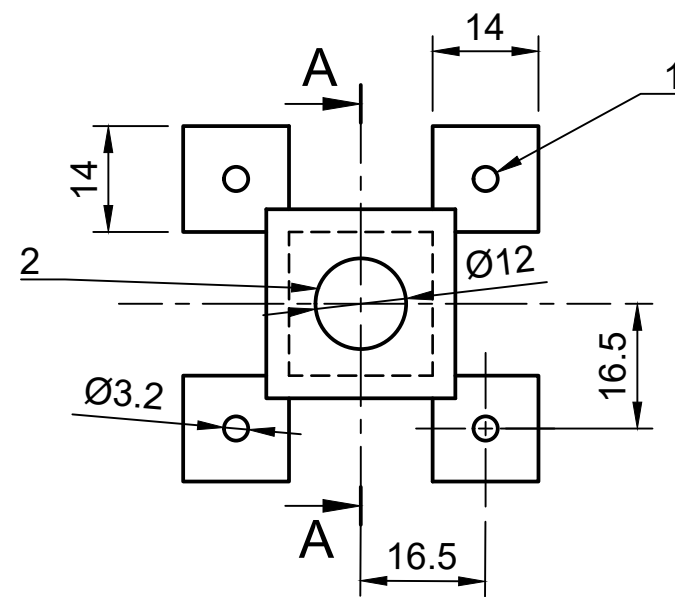
FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1 : 2

PLANO N°: 02

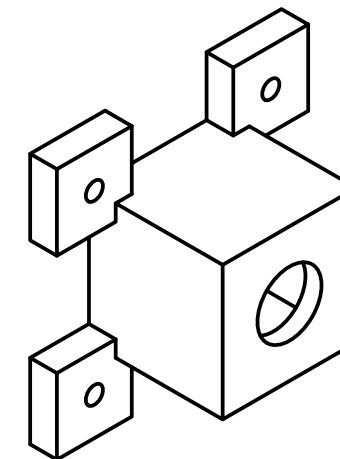
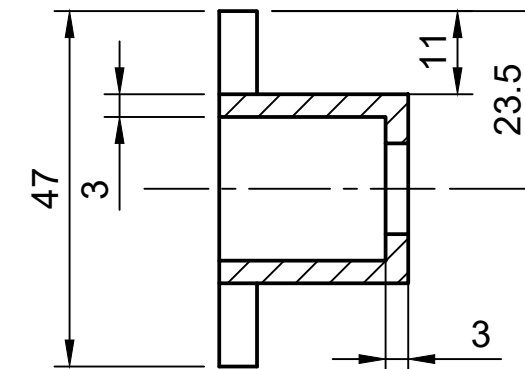
A3





Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Tornillos M3
2	Conector Macho 4 pines (M4)

A-A (1:1)



UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG N°: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

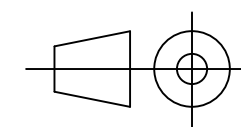
Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Soporte del conector 4 pines del sensor

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío



FIRMA:

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1 : 1

PLANO N°: 03

A3



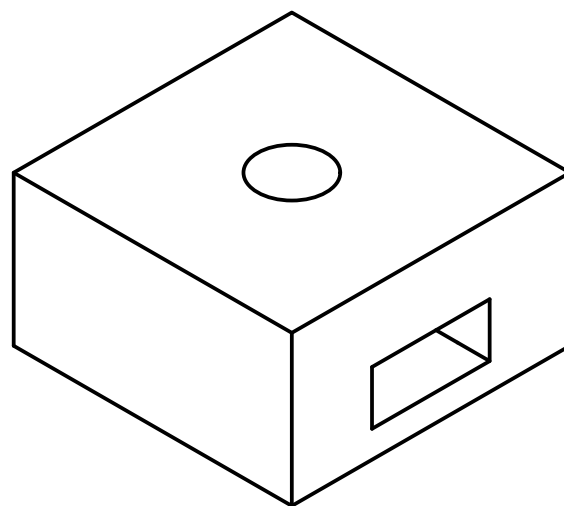
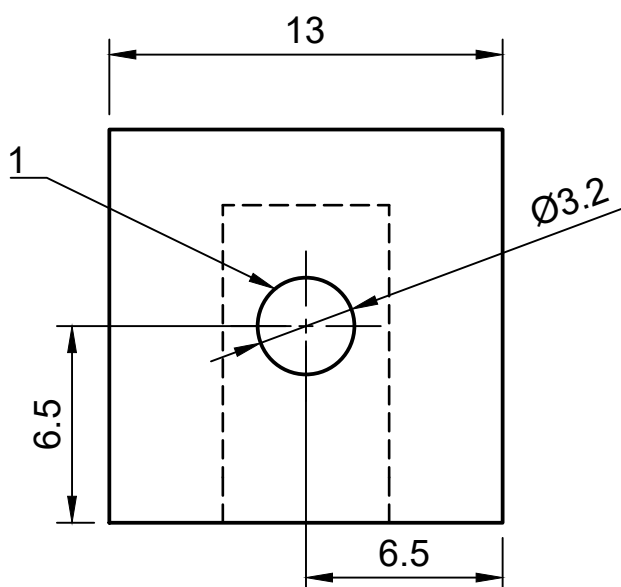
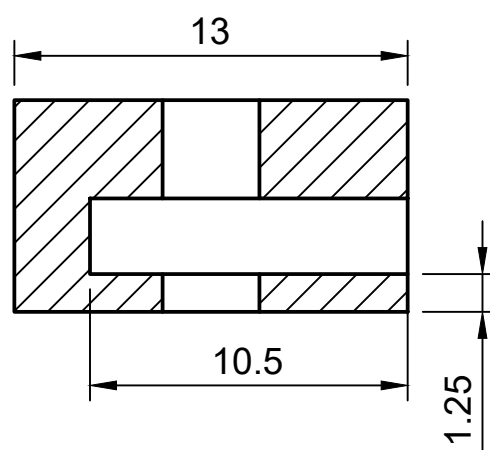
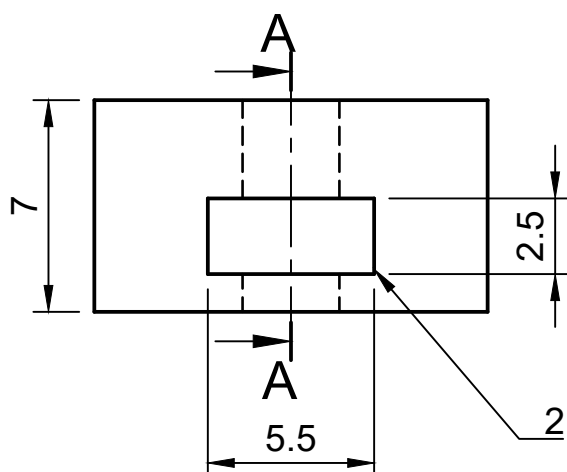
1

2

3

4

A-A (4:1)



## Leyenda de montaje

Número	Descripción
1	Tornillo M3
2	Tuerca M3



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Soporte para tuerca (M3)

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 4:1

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío

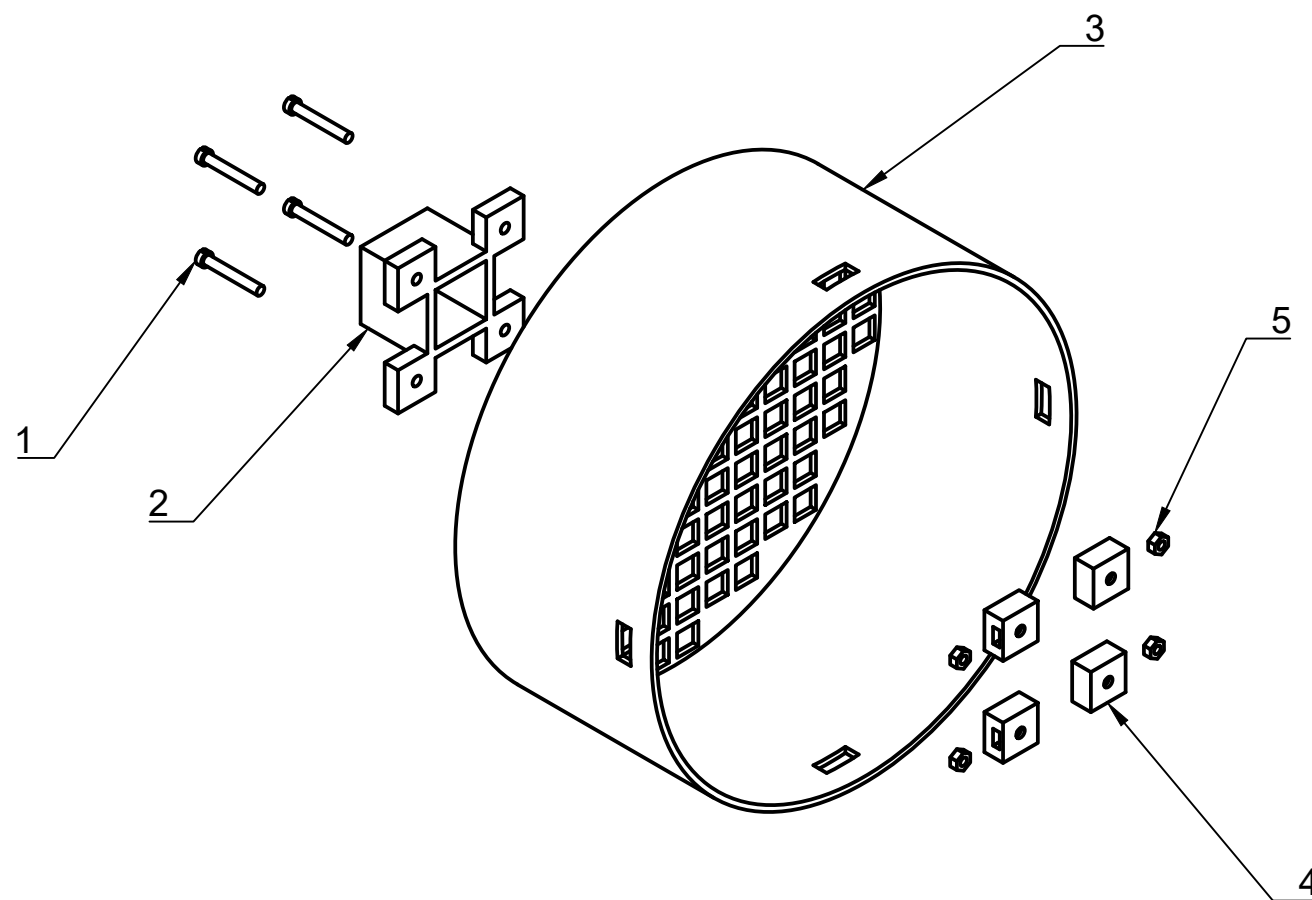
FIRMA:

PLANO Nº: 04

A4







Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Tornillos métrica 3
2	Soporte conector sensor 4 pines
3	Protector del sistema de ventilación del motor y soporte del sensor
4	Soporte para tuercas de métrica 3
5	Tuercas métrica 3



UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

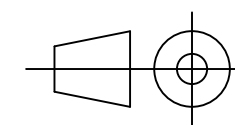
TFG N°: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Vista explosionada soporte del codificador magnético



FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1 : 2

AUTOR:

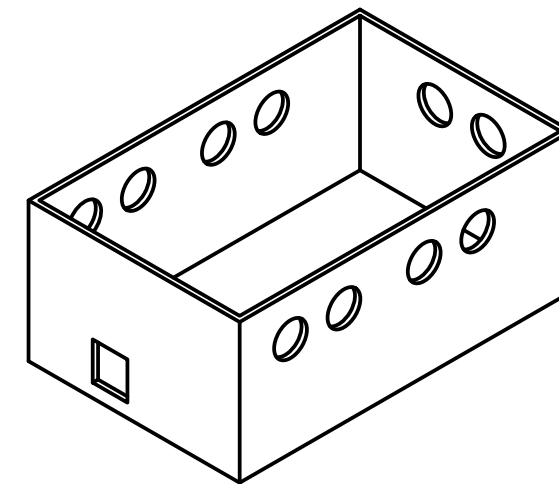
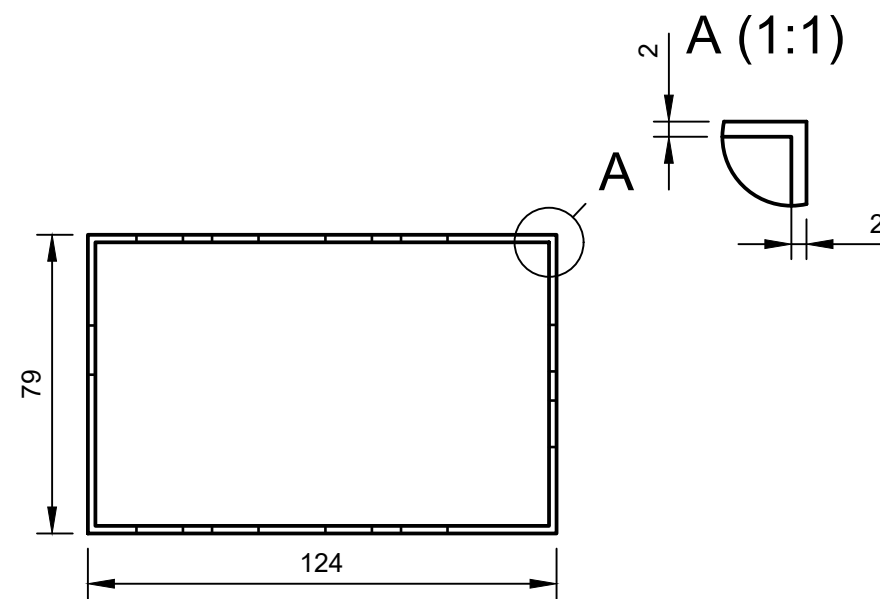
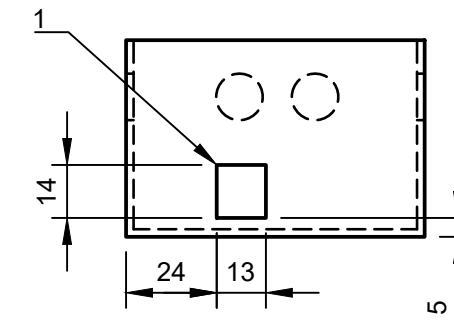
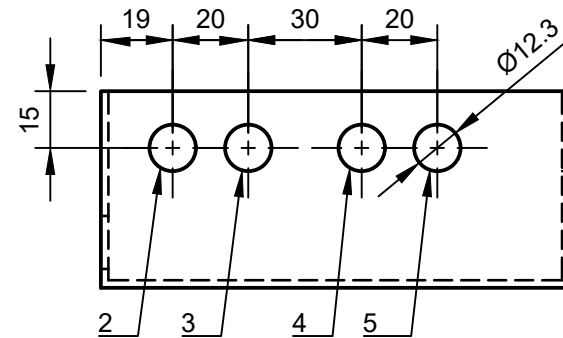
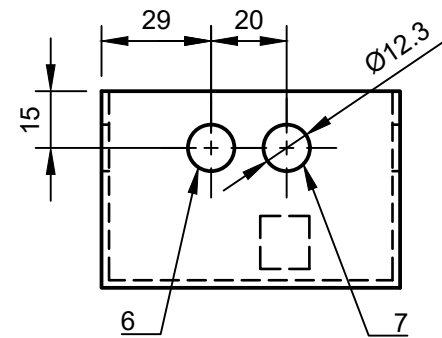
Álvaro Michelena Grandío

FIRMA:


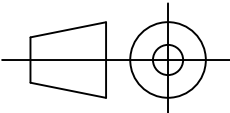
PLANO N°: 05

A3

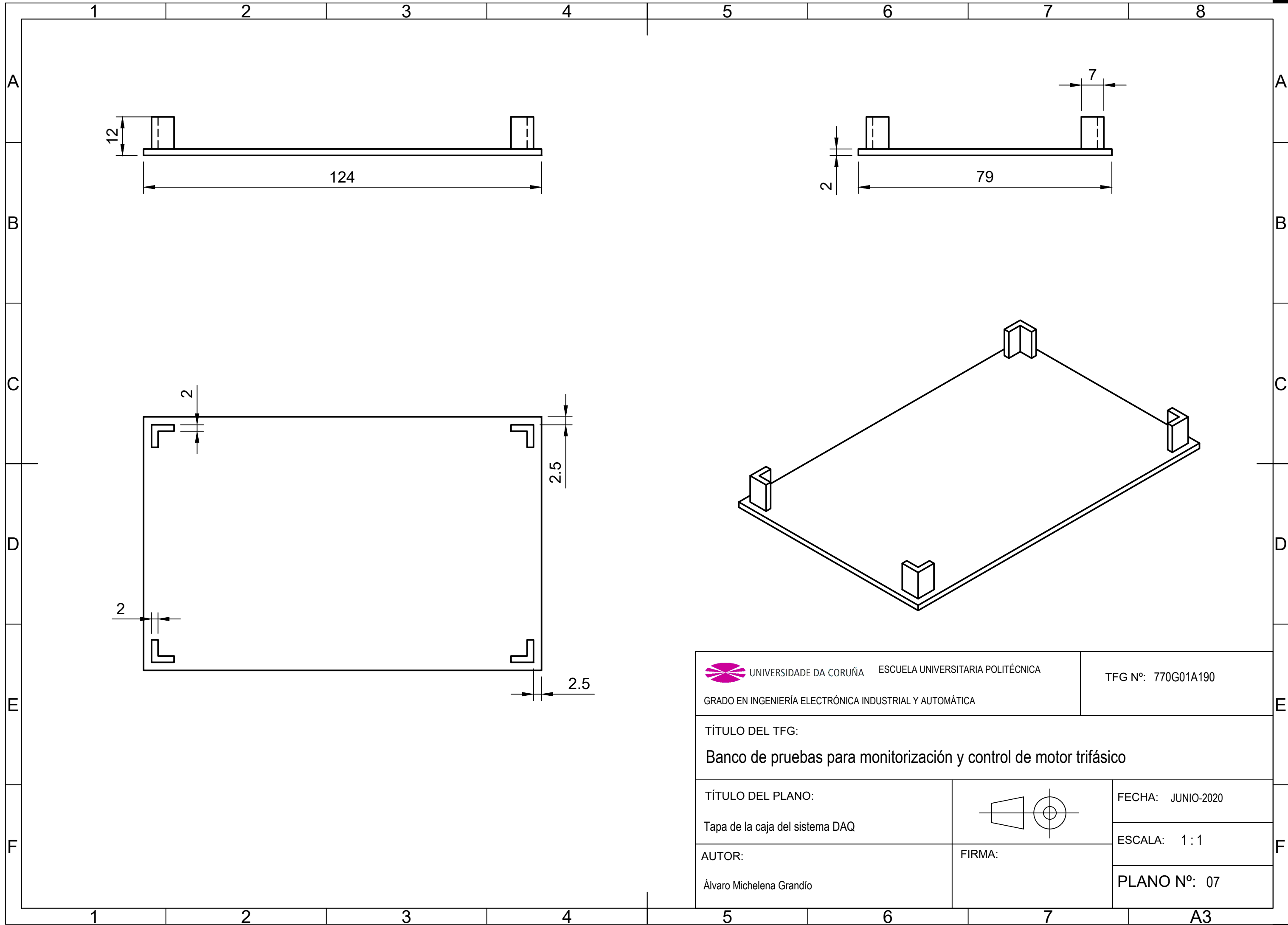




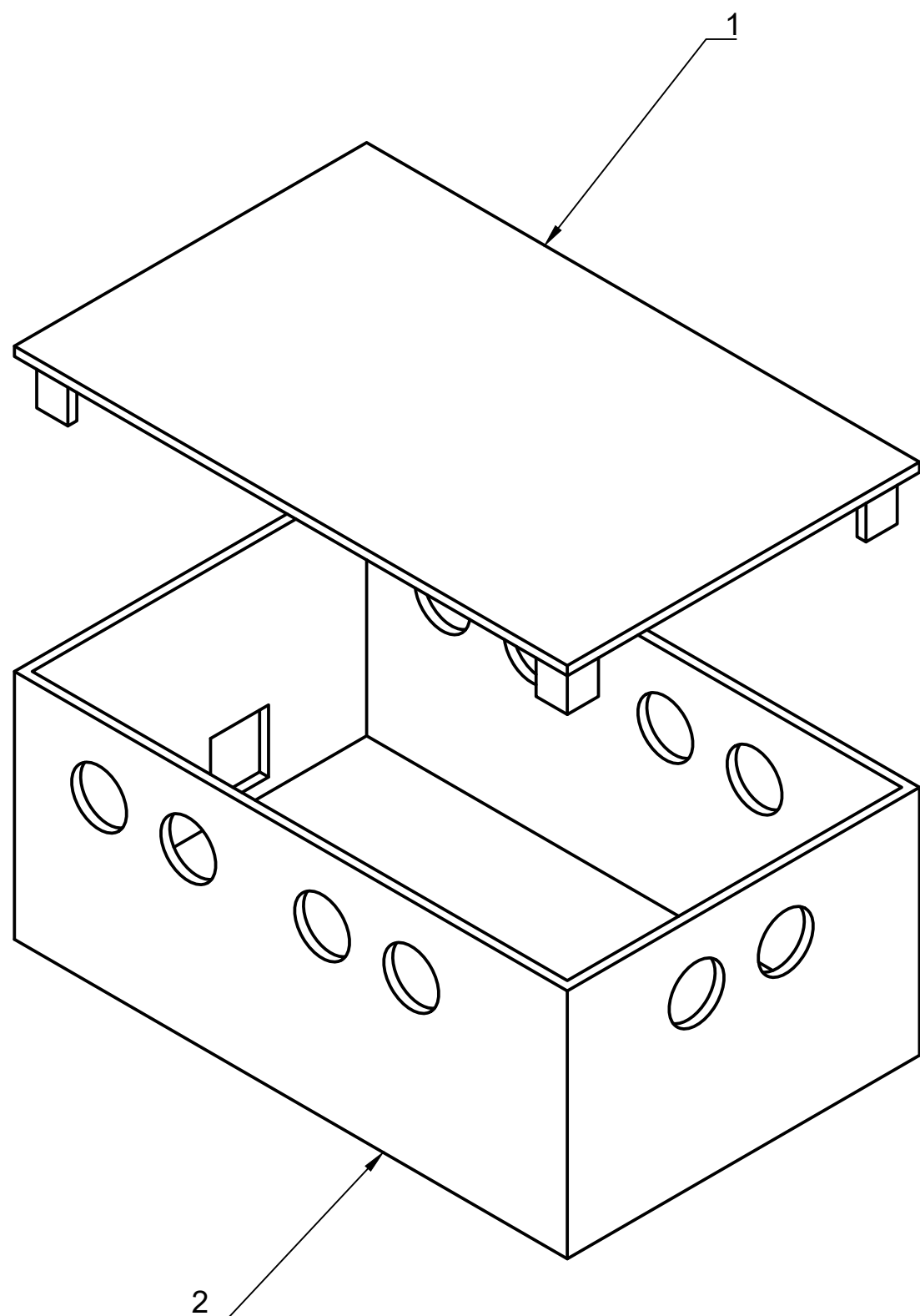
Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Conector hembra USB tipo B (Arduino)
2, 3, 4, 5, 6, 7	Conectores hembra banana 4 mm

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA		TFG N°: 770G01A190
TÍTULO DEL TFG: <b>Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico</b>		
TÍTULO DEL PLANO: Caja para el sistema de adquisición de datos (DAQ)		FECHA: JUNIO-2020
		ESCALA: 1 : 2
AUTOR: Álvaro Michelena Grandío	FIRMA:	PLANO N°: 06









Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Tapa caja DAQ
2	Caja DAQ (conectores)



UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG N°: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

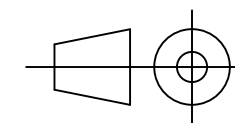
Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Vista explosionada de la caja del sistema DAQ

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío



FIRMA:

FECHA: JUNIO-2020

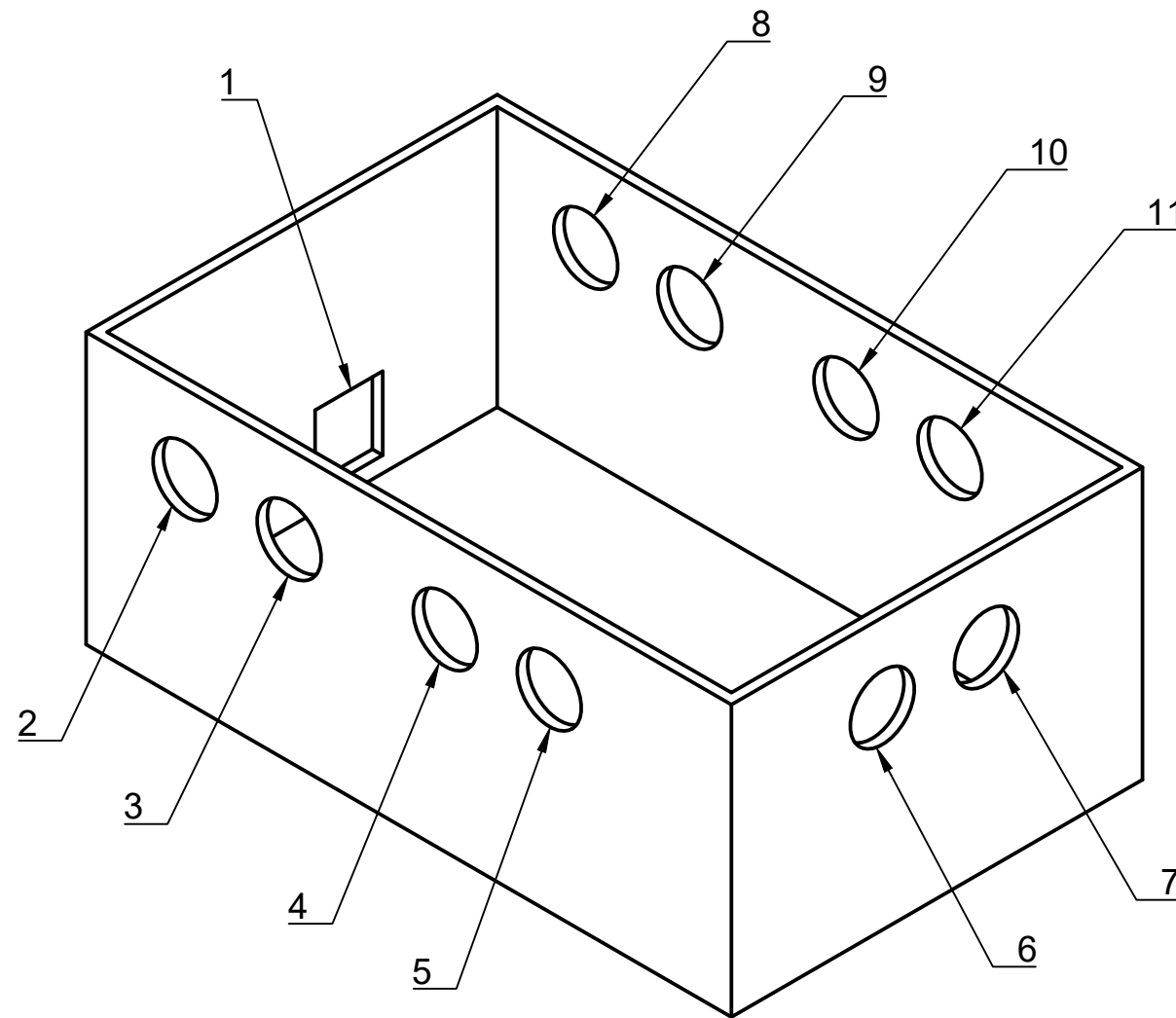
ESCALA: 1 : 1

PLANO N°: 08-1


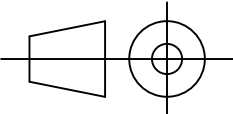
A3



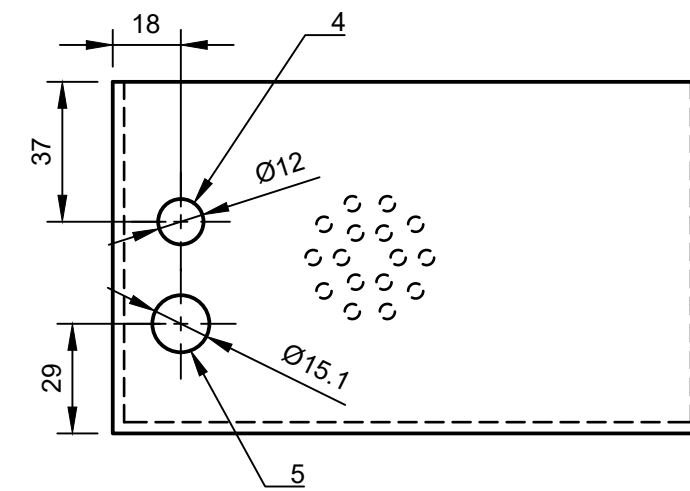
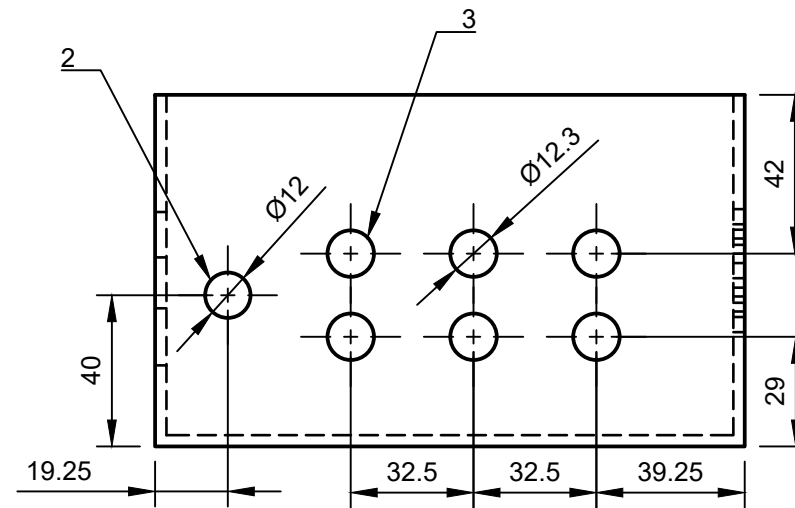
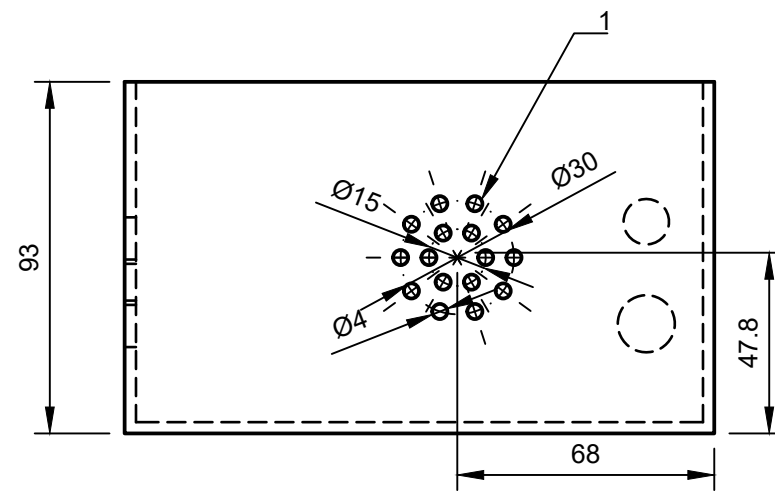




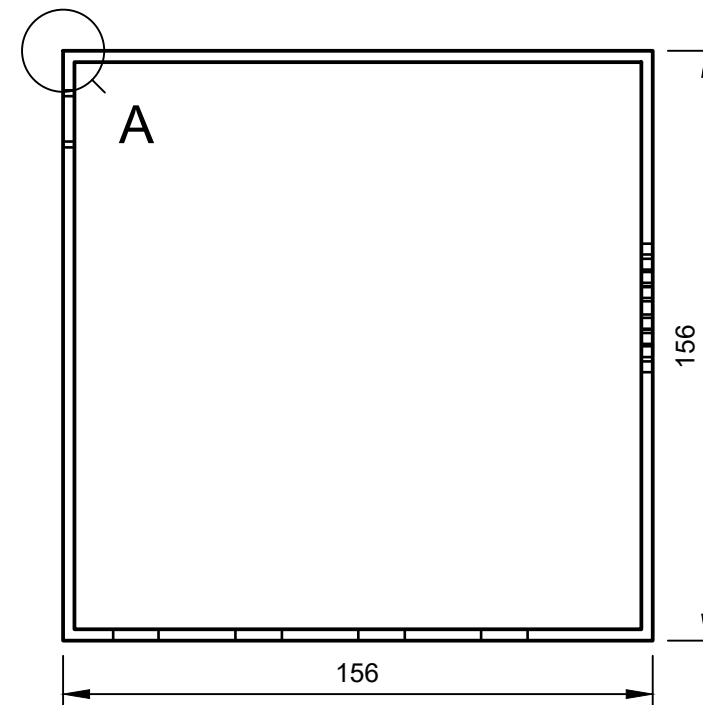
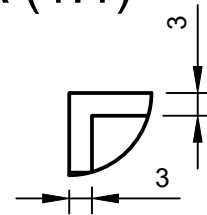
Leyenda de conectores	
Número	Descripción
1	Conector USB (tipo B) para comunicación con el PC (Puerto serie)
2	Conector banana hembra 4mm (rojo) para la señal de entrada Canal 0
3	Conector banana hembra 4mm (negro) para la señal de entrada Canal 0 (común)
4	Conector banana hembra 4mm (rojo) para la señal de entrada Canal 1
5	Conector banana hembra 4mm (negro) para la señal de entrada Canal 1 (común)
6	Conector banana hembra 4mm (negro) para la entrada de alimentación (GND)
7	Conector banana hembra 4mm (rojo) para la entrada de alimentación (+12V DC)
8	Conector banana hembra 4mm (rojo) para la señal de salida Canal 0
9	Conector banana hembra 4mm (negro) para la señal de salida Canal 0 (común)
10	Conector banana hembra 4mm (rojo) para la señal de salida Canal 1
11	Conector banana hembra 4mm (negro) para la señal de salida Canal 1 (común)

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA		TFG Nº: 770G01A190
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA		
TÍTULO DEL TFG: Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico		
TÍTULO DEL PLANO: Identificación de conectores caja DAQ		FECHA: JUNIO-2020
AUTOR: Álvaro Michelena Grandío		ESCALA: 1 : 1
		PLANO Nº: 08-2

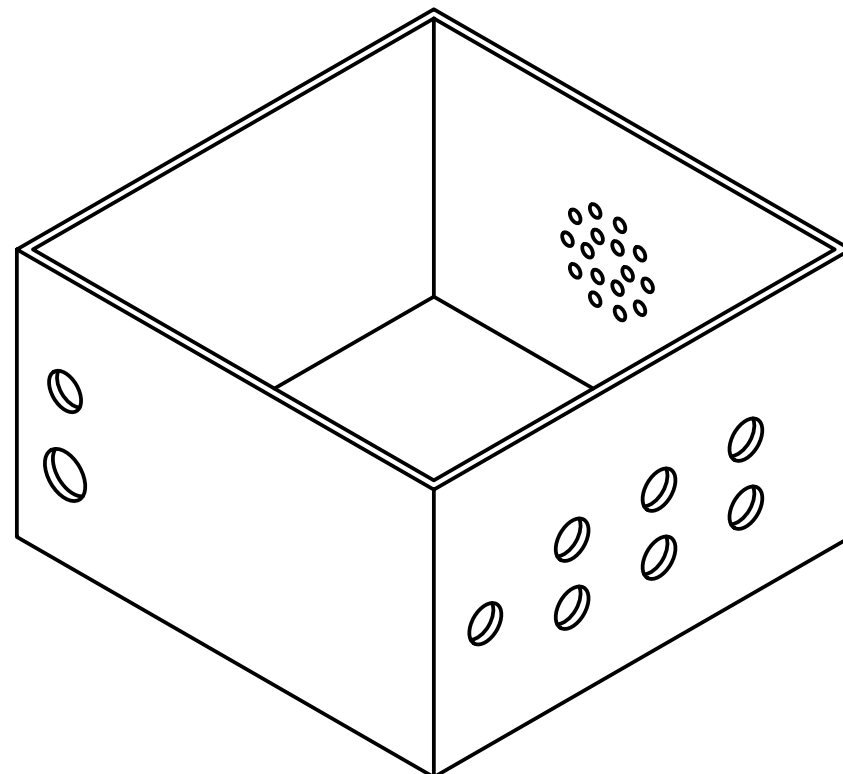




A (1:1)



Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Entramado de ventilación
2	Conector sensor 4 pines macho
3	Conectores banana 4 mm (hembra)
4	Prensaestopa PG7 para final de carrera
5	Prensaestopa PG9 para alimentación fuente DC



UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG N°: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

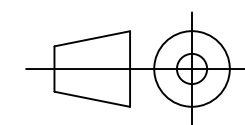
Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Caja general del sistema

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío



FIRMA:

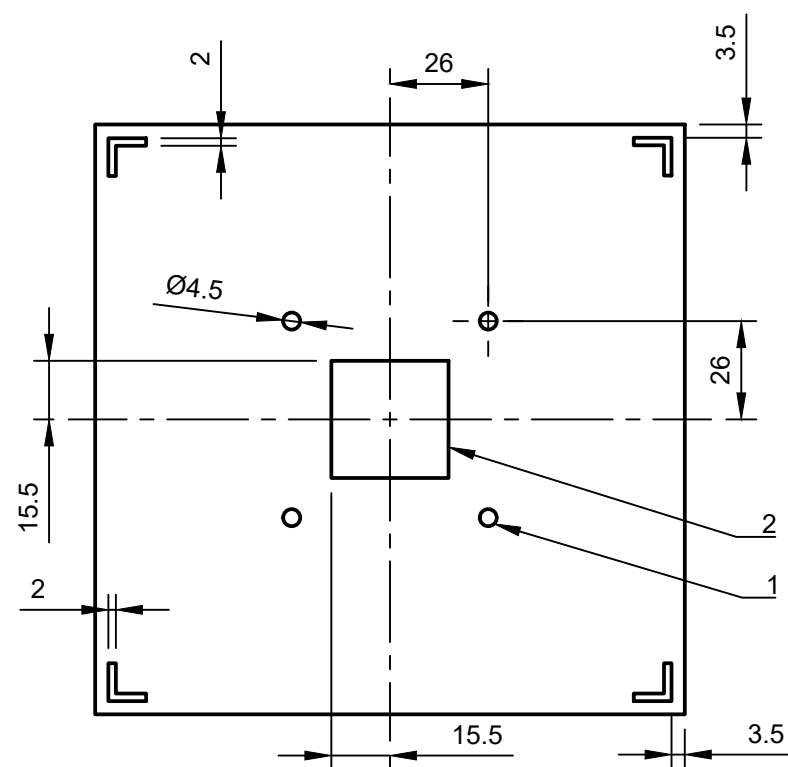
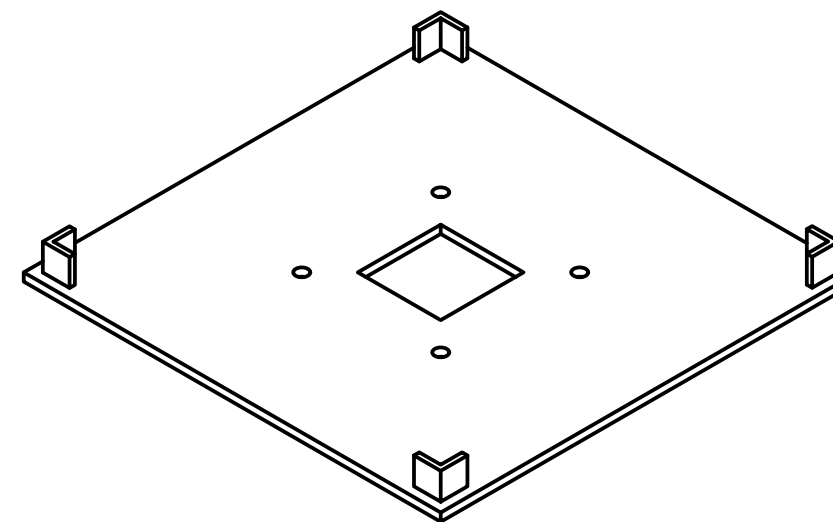
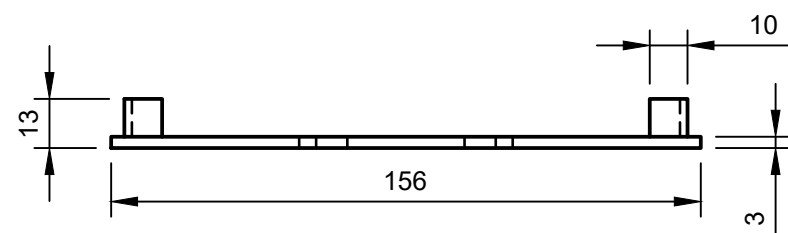
FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1 : 2


PLANO N°: 09

A3





Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Agujeros pasantes para tornillos de métrica 4
2	Agujero para pasar los contactos NC y NA de la seta de emergencia


 UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
 GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG N°: 770G01A190

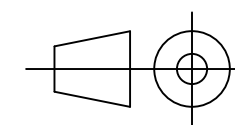
TÍTULO DEL TFG:  
**Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico**

TÍTULO DEL PLANO:

Tapa de la caja general del sistema

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío



FIRMA:

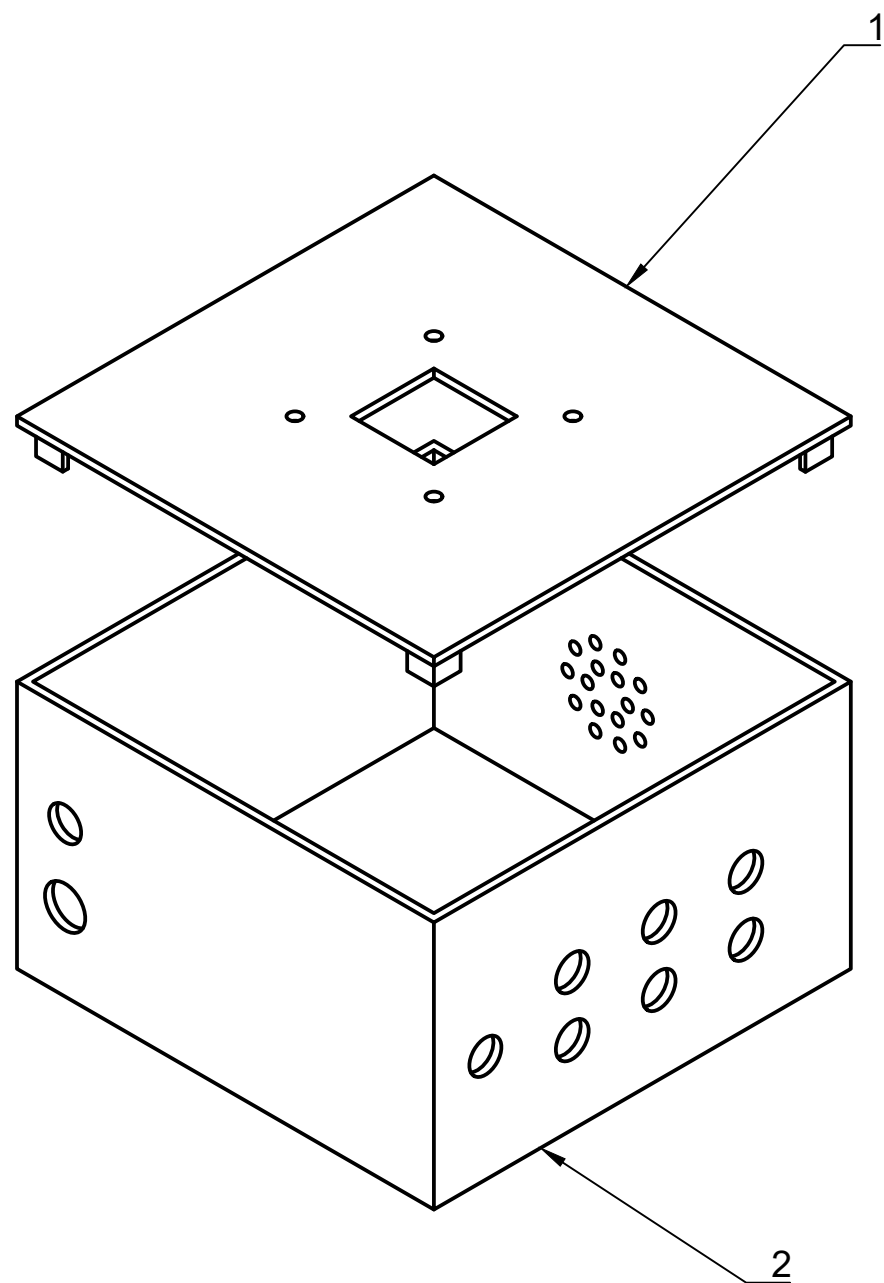
FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1 : 2


PLANO N°: 10

A3





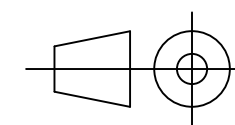
Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Tapa de la caja general
2	Caja general (conectores)

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG N°: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:  
Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:  
Vista explosionada de la caja general del sistema



FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1 : 2

AUTOR:  
Álvaro Michelena Grandío

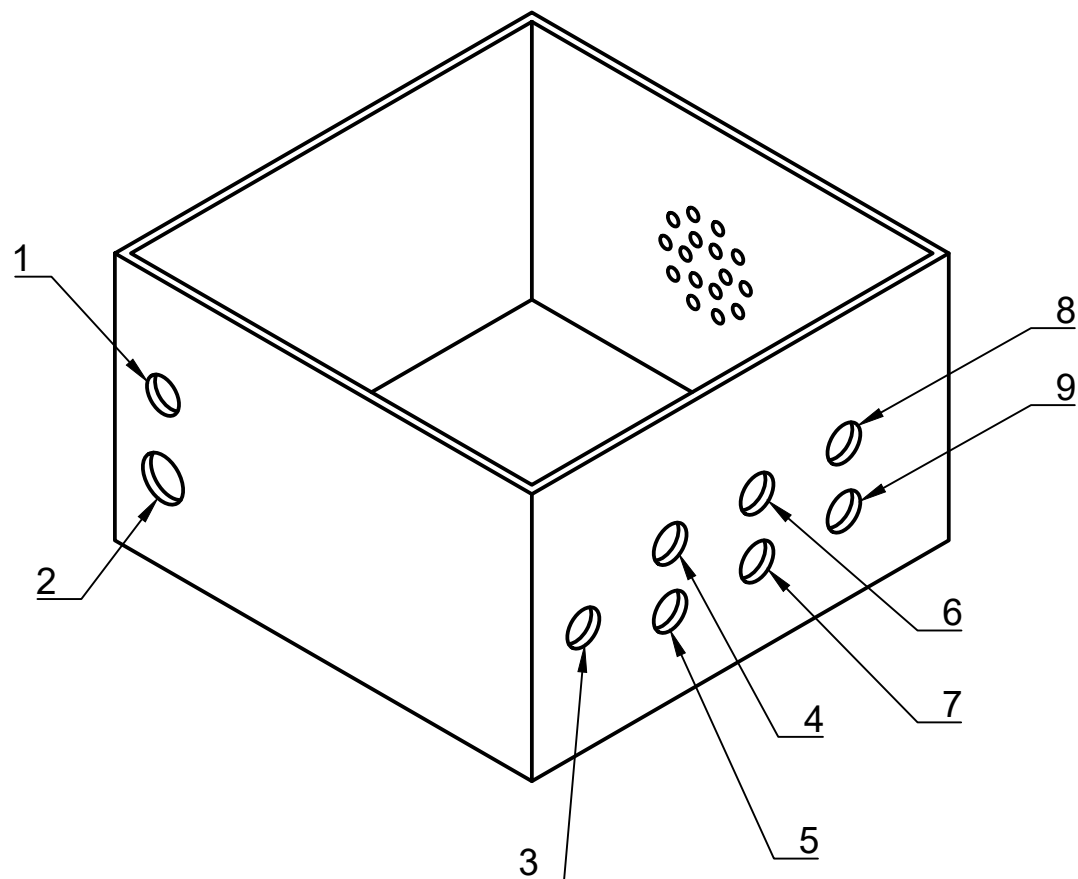
FIRMA:

PLANO N°: 11-1


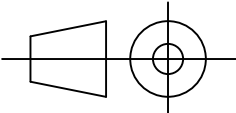
A3



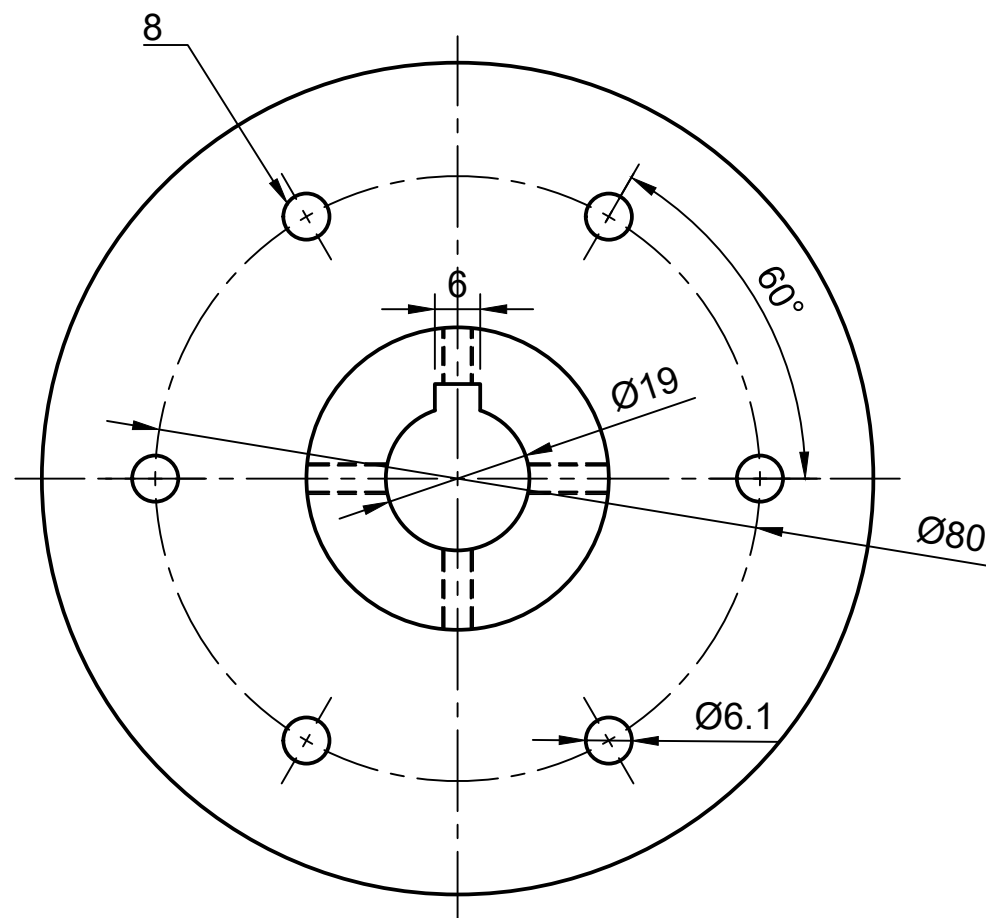
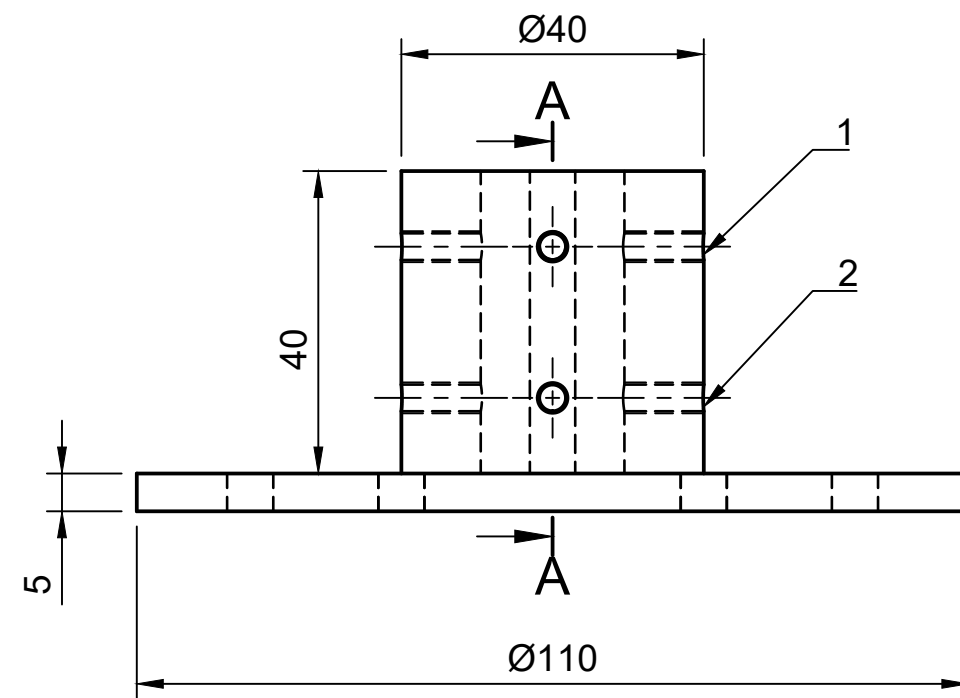




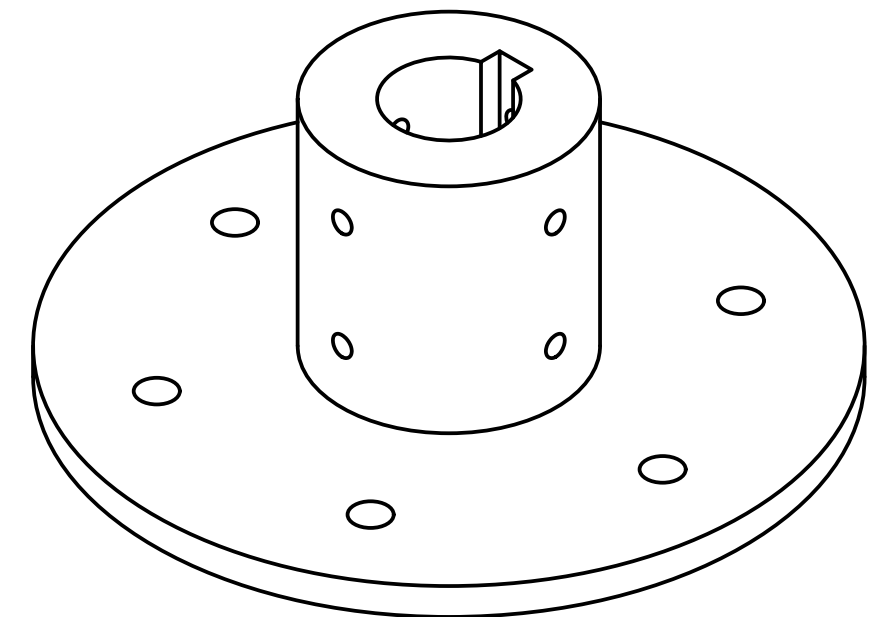
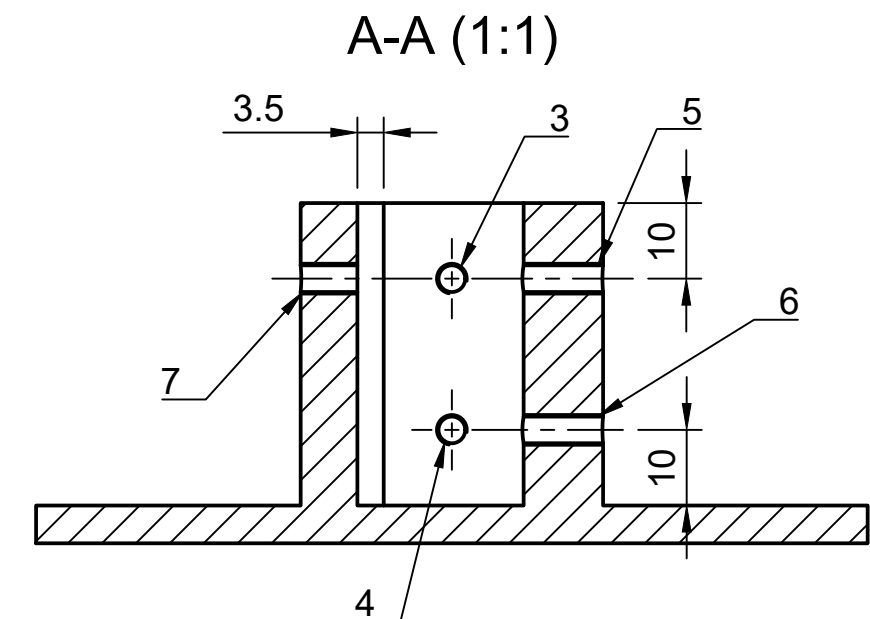
Leyenda de conectores	
Número	Descripción
1	Prensaestopa PG7 para el cable de conexión con final de carrera de la puerta de la caja de protección
2	Prensaestopa PG9 para la entrada de alimentación 230 V AC de la fuente DC
3	Conector macho 4 pines (base) para la conexión del sensor
4	Conector banana hembra 4mm (rojo) para la señal de entrada 24V de control marcha/paro del variador de frecuencia
5	Conector banana hembra 4mm (negro) para la señal control marcha/paro (LI1) del variador de frecuencia
6	Conector banana hembra 4mm (rojo) para la salida de alimentación (+12V DC) para alimentación del DAQ
7	Conector banana hembra 4mm (negro) para la salida de alimentación (GND) para alimentación del DAQ
8	Conector banana hembra 4mm (rojo) para la señal de salida 0/10V del sistema de adaptación de la señal del sensor
9	Conector banana hembra 4mm (negro) para la señal de salida 0/10V del sistema de adaptación de la señal del sensor (común)

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA		TFG N°: 770G01A190	
TÍTULO DEL TFG: <b>Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico</b>			
TÍTULO DEL PLANO: Identificación de conectores caja general			
AUTOR:		FIRMA:	
Álvaro Michelena Grandío			
		FECHA: JUNIO-2020	
		ESCALA: 1 : 2	
		PLANO N°: 11-2	





Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	Rosca M4x0.5
3	Agujeros pasantes para tornillos de soporte de discos



UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG N°: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

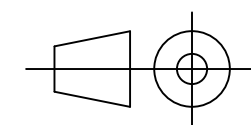
Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Acople de motor a cargas

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío



FIRMA:

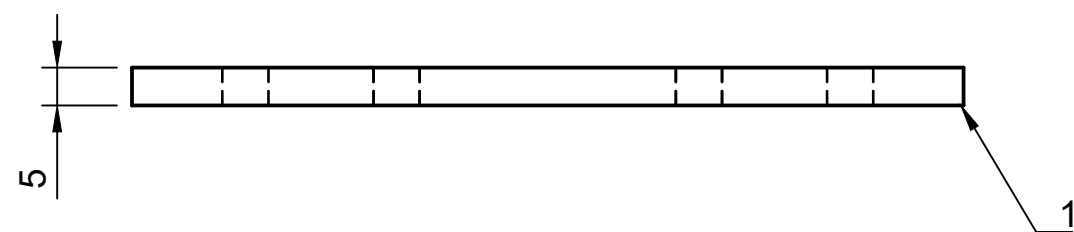
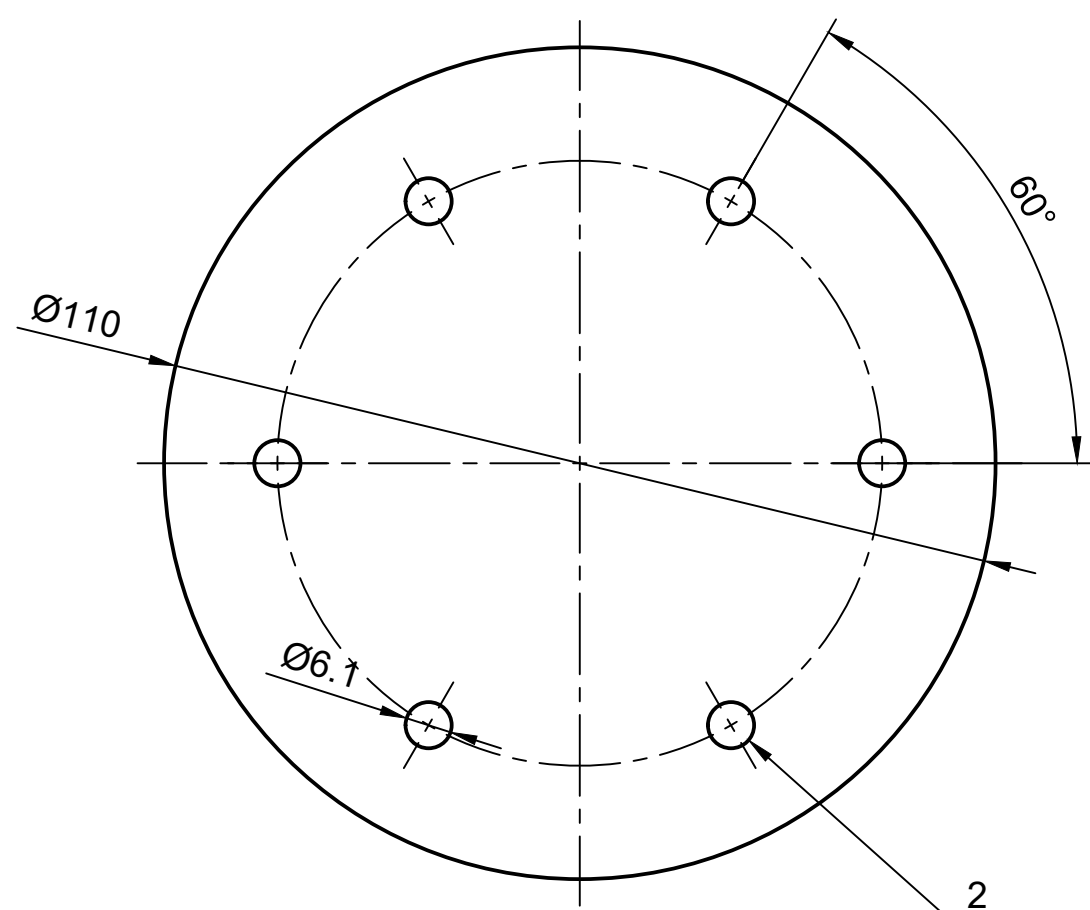
FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1 : 1

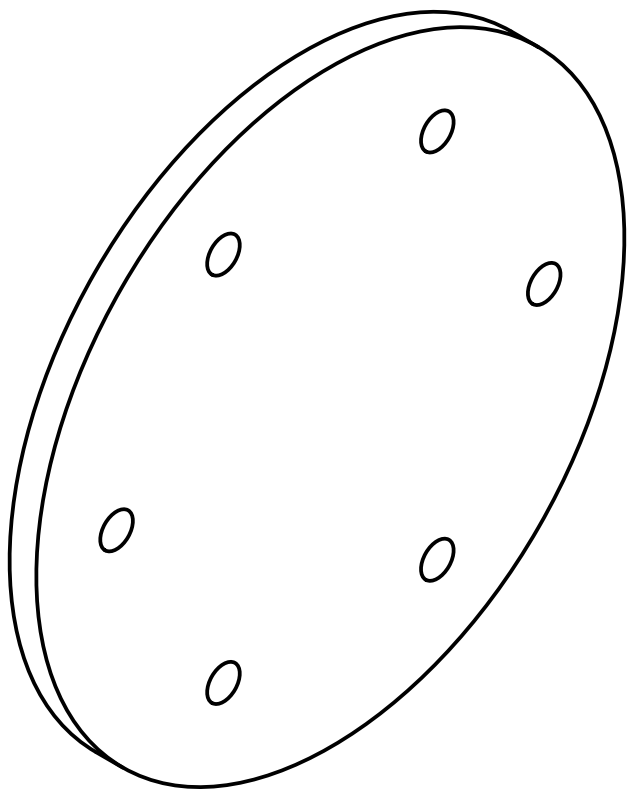
PLANO N°: 12


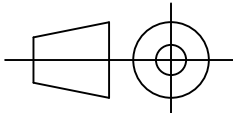
A3



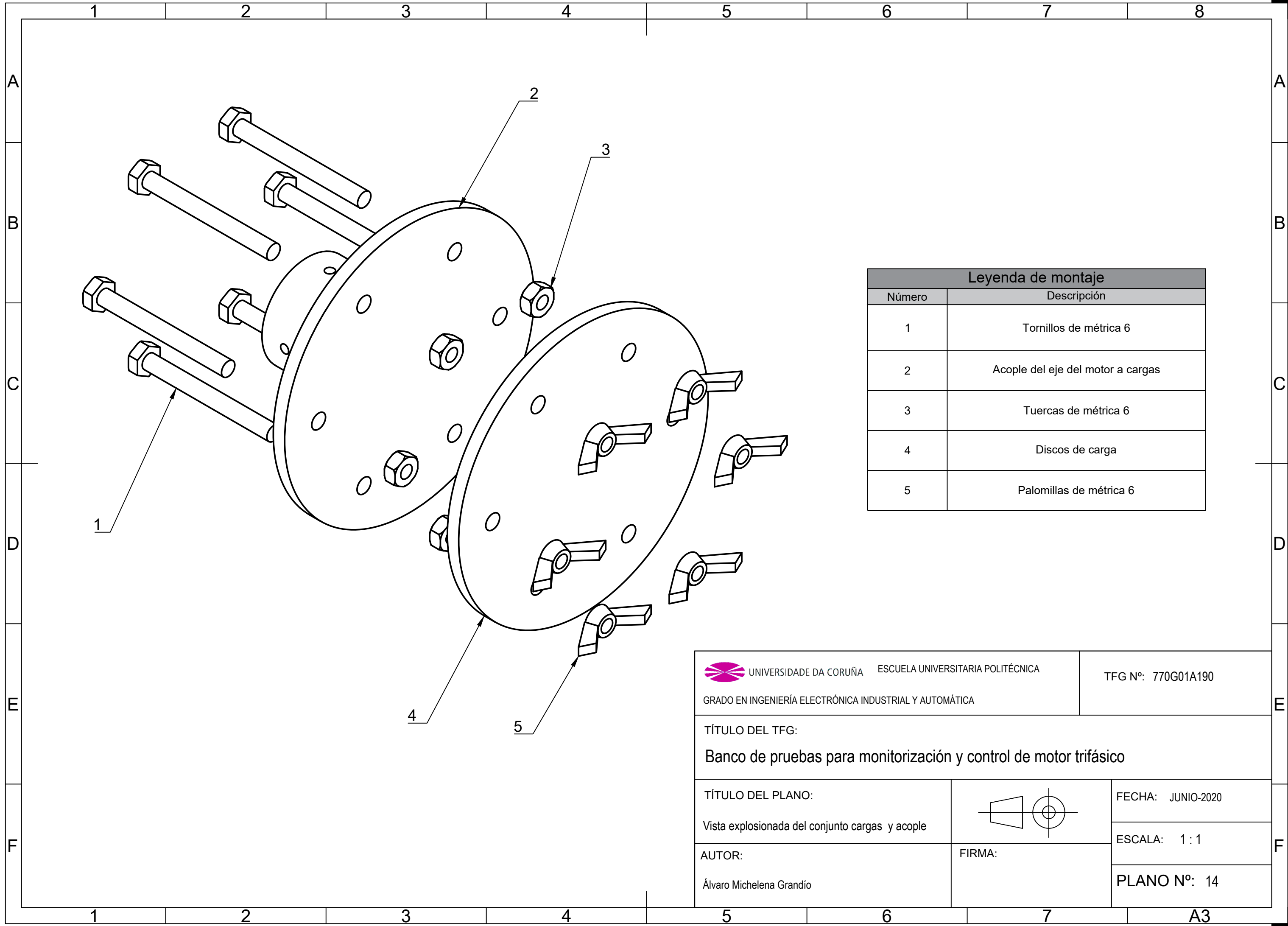


Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Grosos de chapa diferentes para cada disco
2	Agujeros pasantes para acoplar el disco al soporte


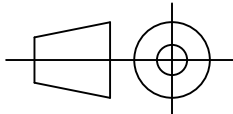


 UNIVERSIDADE DA CORUÑA    ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA		TFG N°: 770G01A190	
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA			
TÍTULO DEL TFG:  Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico			
TÍTULO DEL PLANO:  Cargas del sistema (Discos)			
AUTOR:  Álvaro Michelena Grandío			
		FECHA: JUNIO-2020	
		ESCALA: 1 : 1	
		PLANO N°: 13	



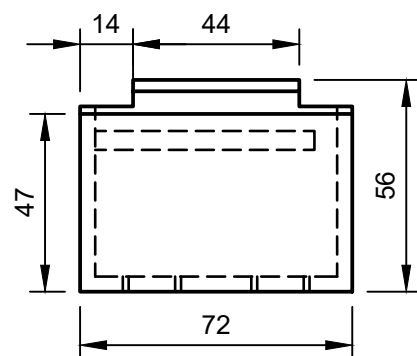
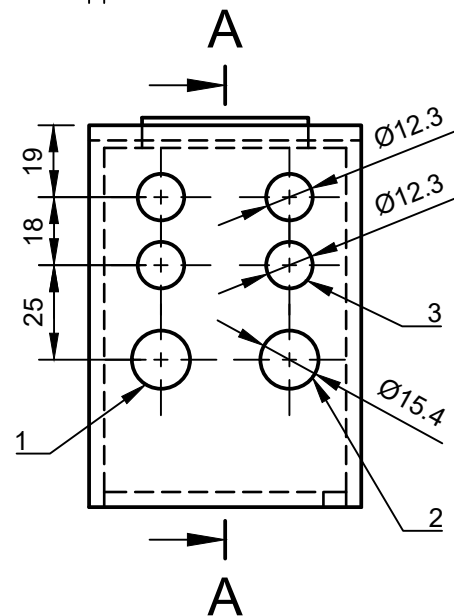
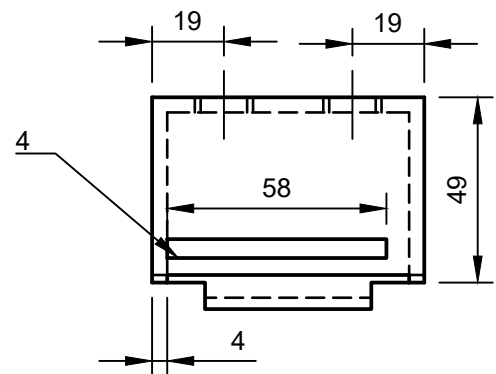


Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Tornillos de métrica 6
2	Acople del eje del motor a cargas
3	Tuercas de métrica 6
4	Discos de carga
5	Palomillas de métrica 6

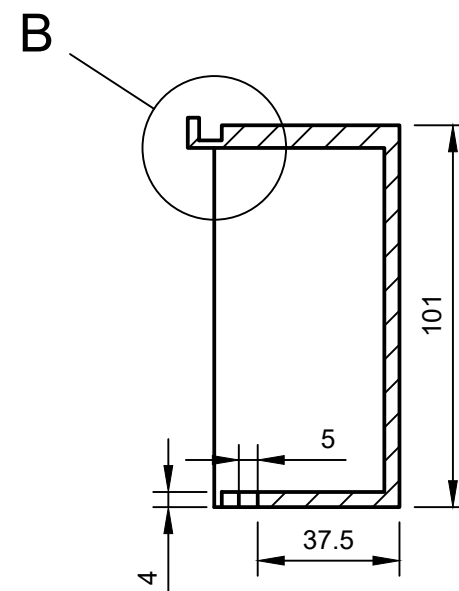
 UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA		TFG N°: 770G01A190	
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA			
TÍTULO DEL TFG:  Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico			
TÍTULO DEL PLANO:  Vista explosionada del conjunto cargas y acople			FECHA: JUNIO-2020
AUTOR:  Álvaro Michelena Grandío			ESCALA: 1 : 1
			PLANO N°: 14



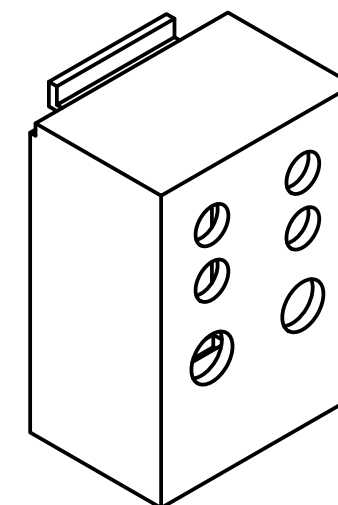
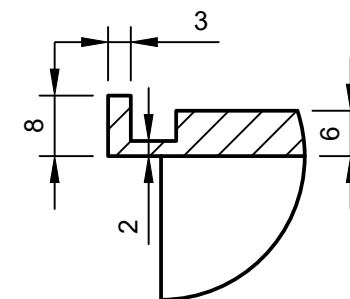




A-A (1:2)



B (1:1)



### Leyenda de montaje

Número	Descripción
1, 2	Prensaestopa PG9
3	Conectores hembra banana 4 mm
4	Ranura para la fijación por tornillos de la carcasa al variador de frecuencia

UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

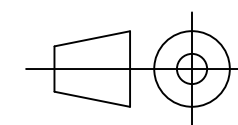
TFG N°: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Carcasa para los contactos del variador de frecuencia



FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1 : 2

AUTOR:

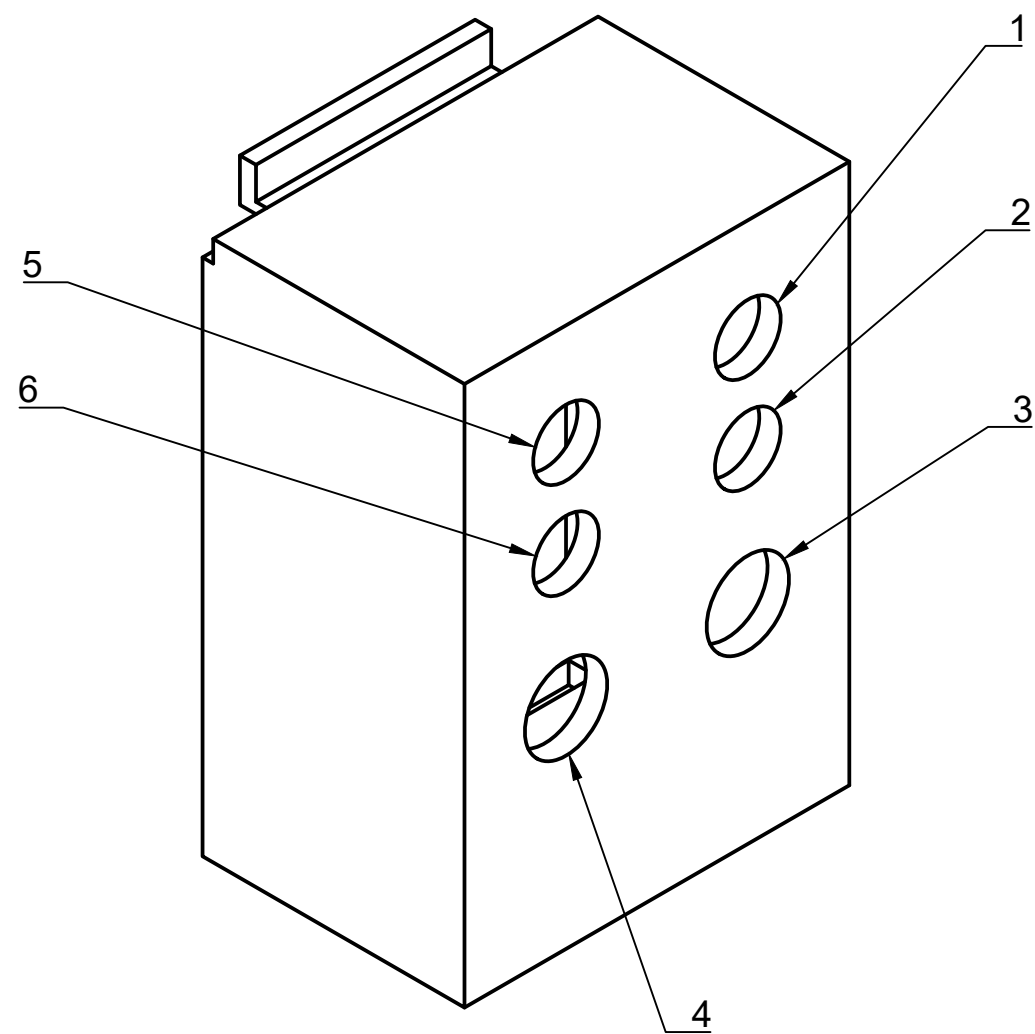
Álvaro Michelena Grandío

FIRMA:


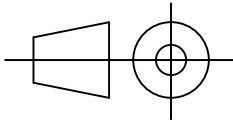
PLANO N°: 15-1

A3

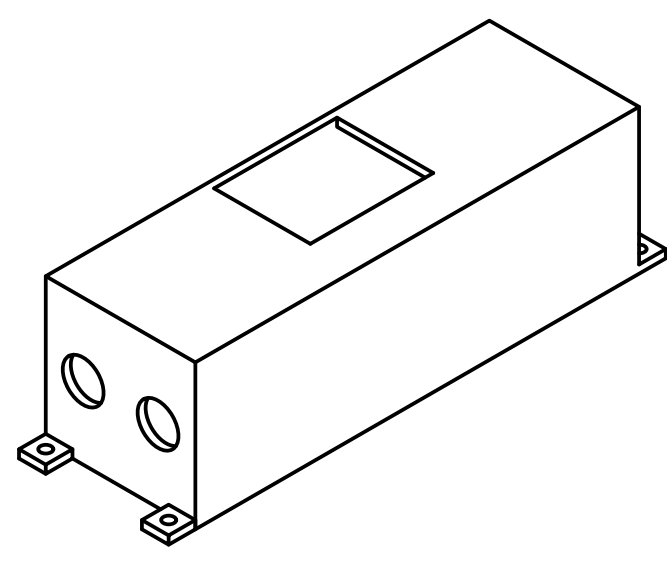
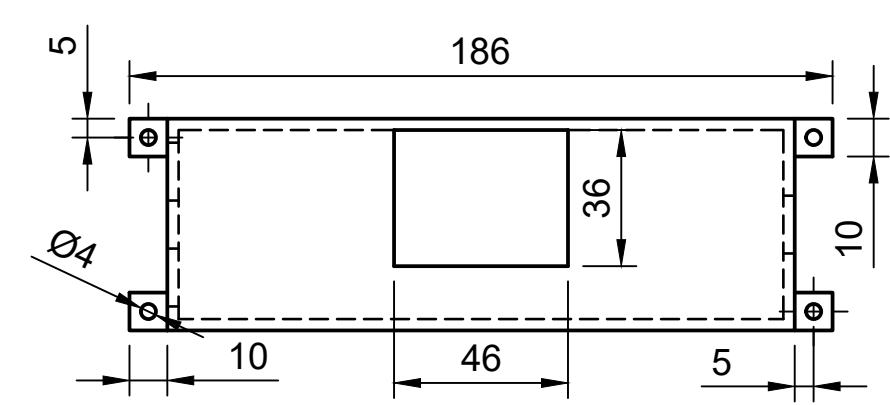
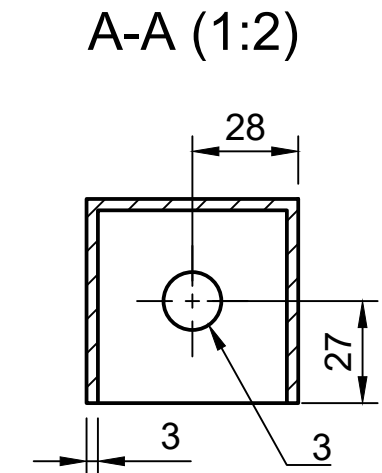
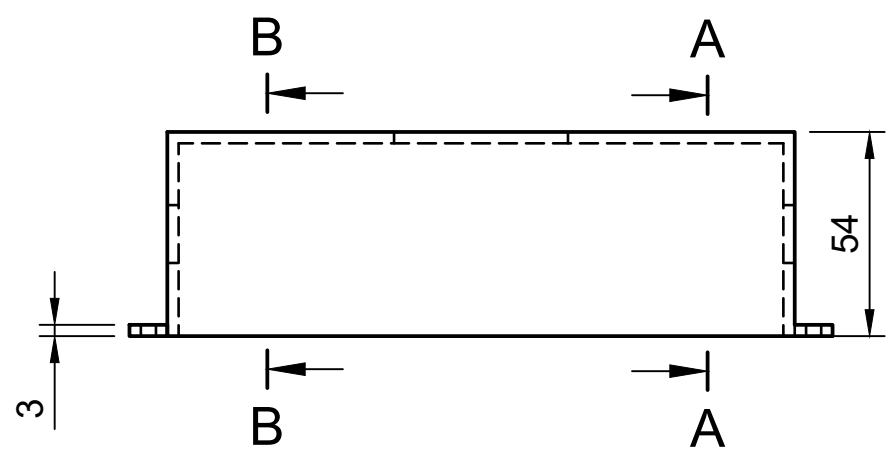
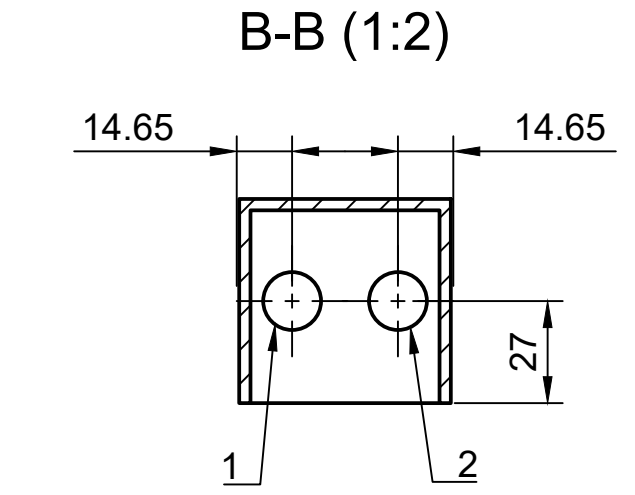





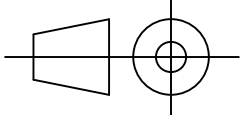
Leyenda de conectores	
Número	Descripción
1	Conector banana hembra 4mm (rojo) para la señal de salida 24V de control marcha/paro del variador de frecuencia
2	Conector banana hembra 4mm (negro) para la señal de control marcha/paro (LI1) del variador de frecuencia
3	Prensaestopa PG9 para la salida de la señal trifásica de alimentación del motor
4	Prensaestopa PG9 para la entrada de la tensión de alimentación del variador (230 V AC)
5	Conector banana hembra 4mm (rojo) para la señal de entrada de control 0/10V (AI1)
6	Conector banana hembra 4mm (negro) para la señal de entrada de control 0/10V (común)

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA    ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA		TFG N°: 770G01A190	
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA			
TÍTULO DEL TFG:  Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico			
TÍTULO DEL PLANO:  Identificación de conectores del protector del variador			FECHA:    JUNIO-2020
AUTOR:  Álvaro Michelena Grandío		FIRMA:	ESCALA:    1 : 1
			PLANO N°: 15-2

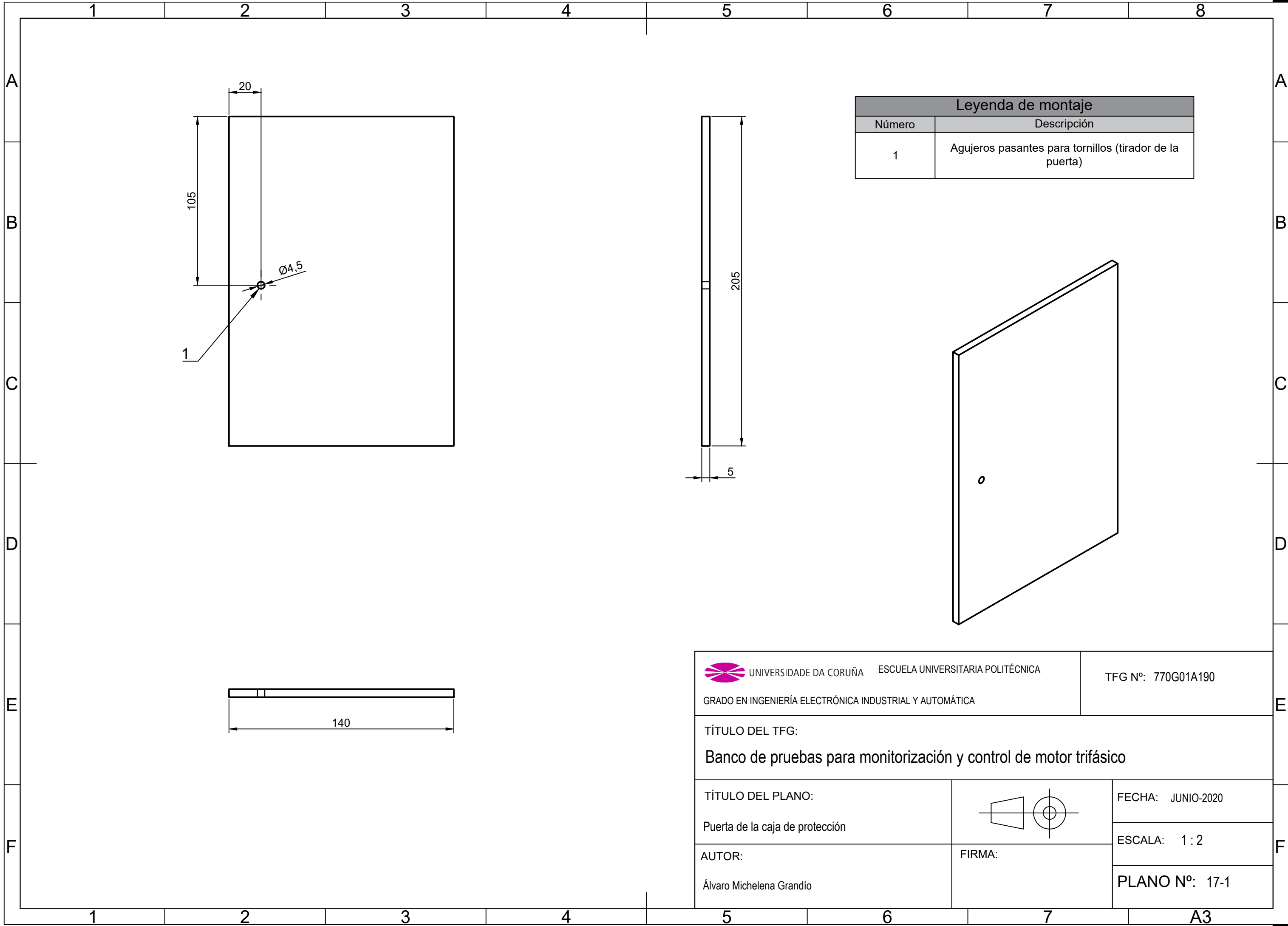




Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Prensaestopa PG9 alimentación fuente DC
2	Prensaestopa PG9 alimentación variador
3	Prensaestopa PG9 alimentación de entrada del proyecto

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA    ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA		TFG Nº: 770G01A190	
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA			
TÍTULO DEL TFG:  Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico			
TÍTULO DEL PLANO:  Carcasa para los contactos del magnetotérmico			FECHA: JUNIO-2020
AUTOR:  Álvaro Michelena Grandío			ESCALA: 1 : 2
		FIRMA:	PLANO Nº: 16





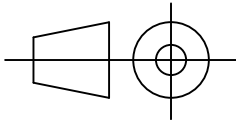
TÍTULO DEL TFG:  
**Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico**

TÍTULO DEL PLANO:

Puerta de la caja de protección

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío



FIRMA:

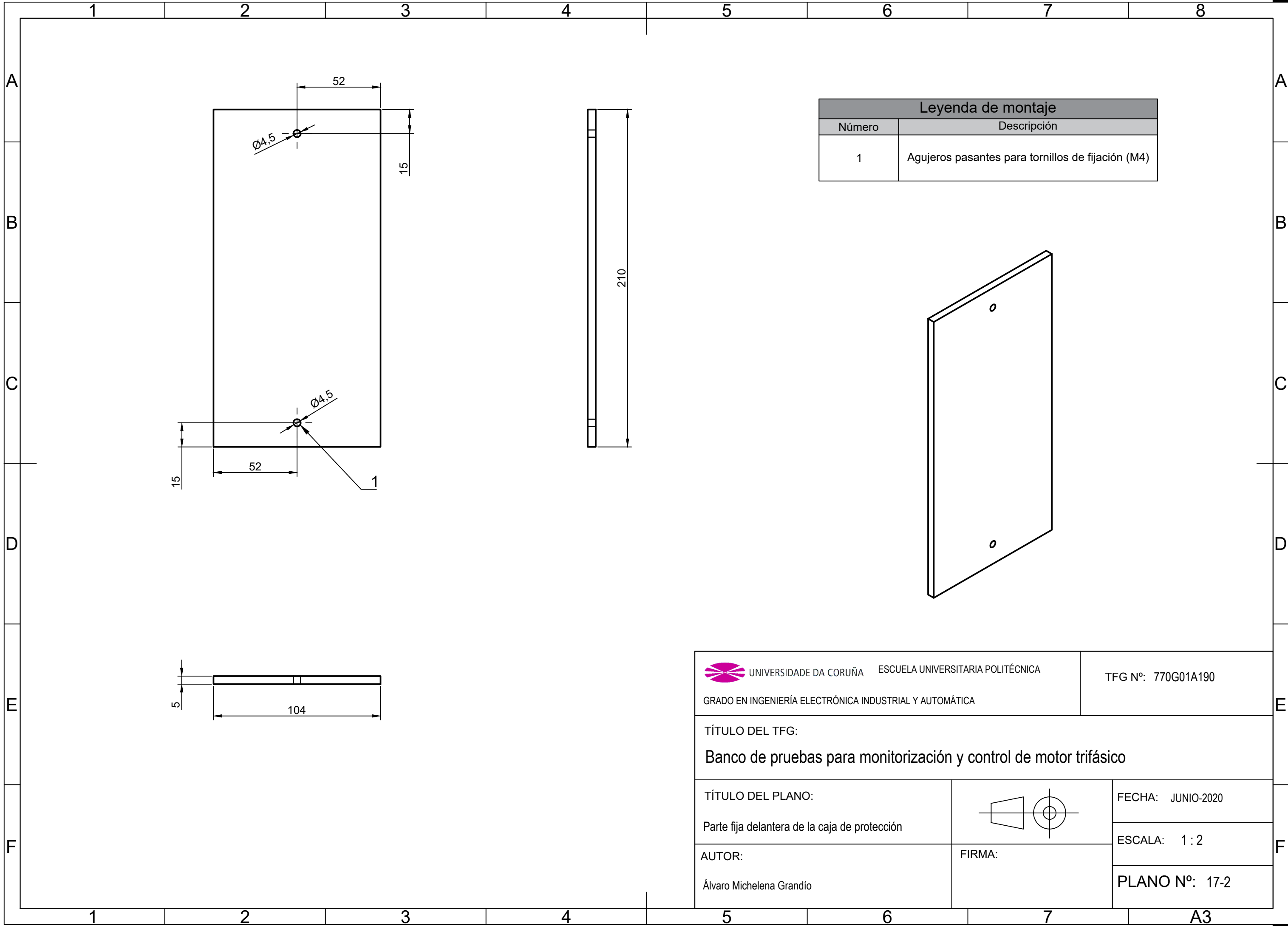
FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1 : 2

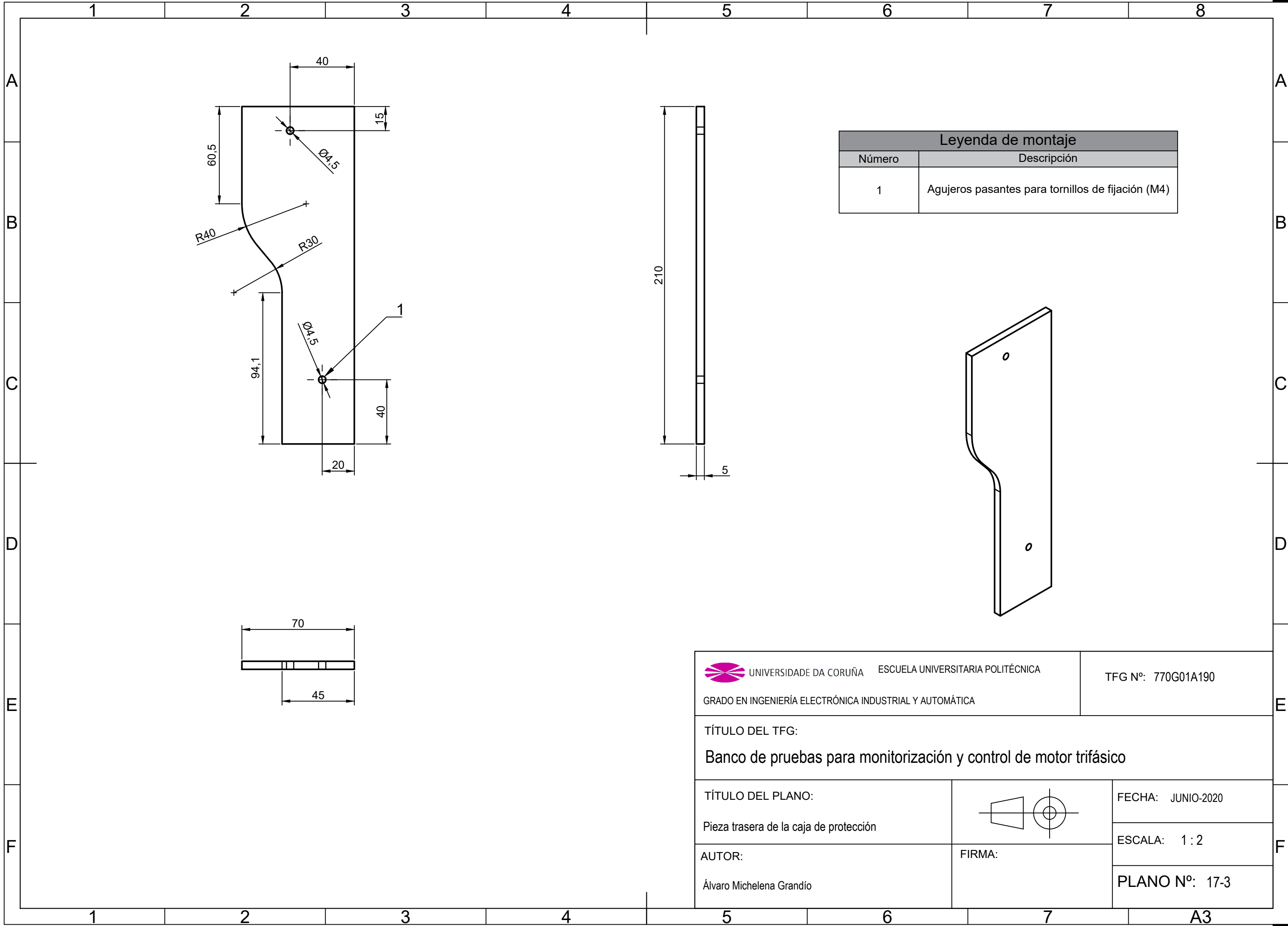
PLANO N°: 17-1



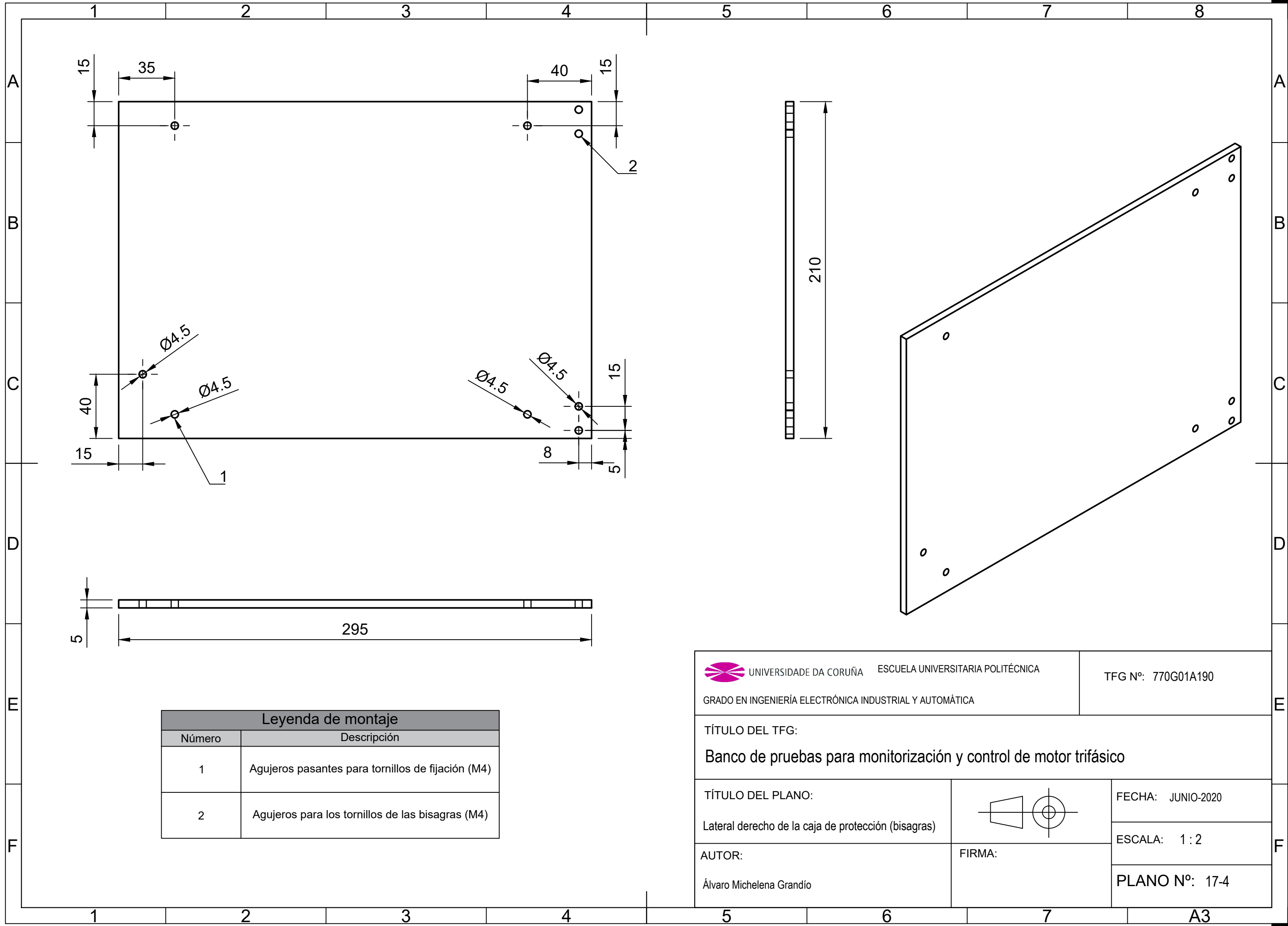



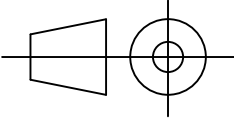




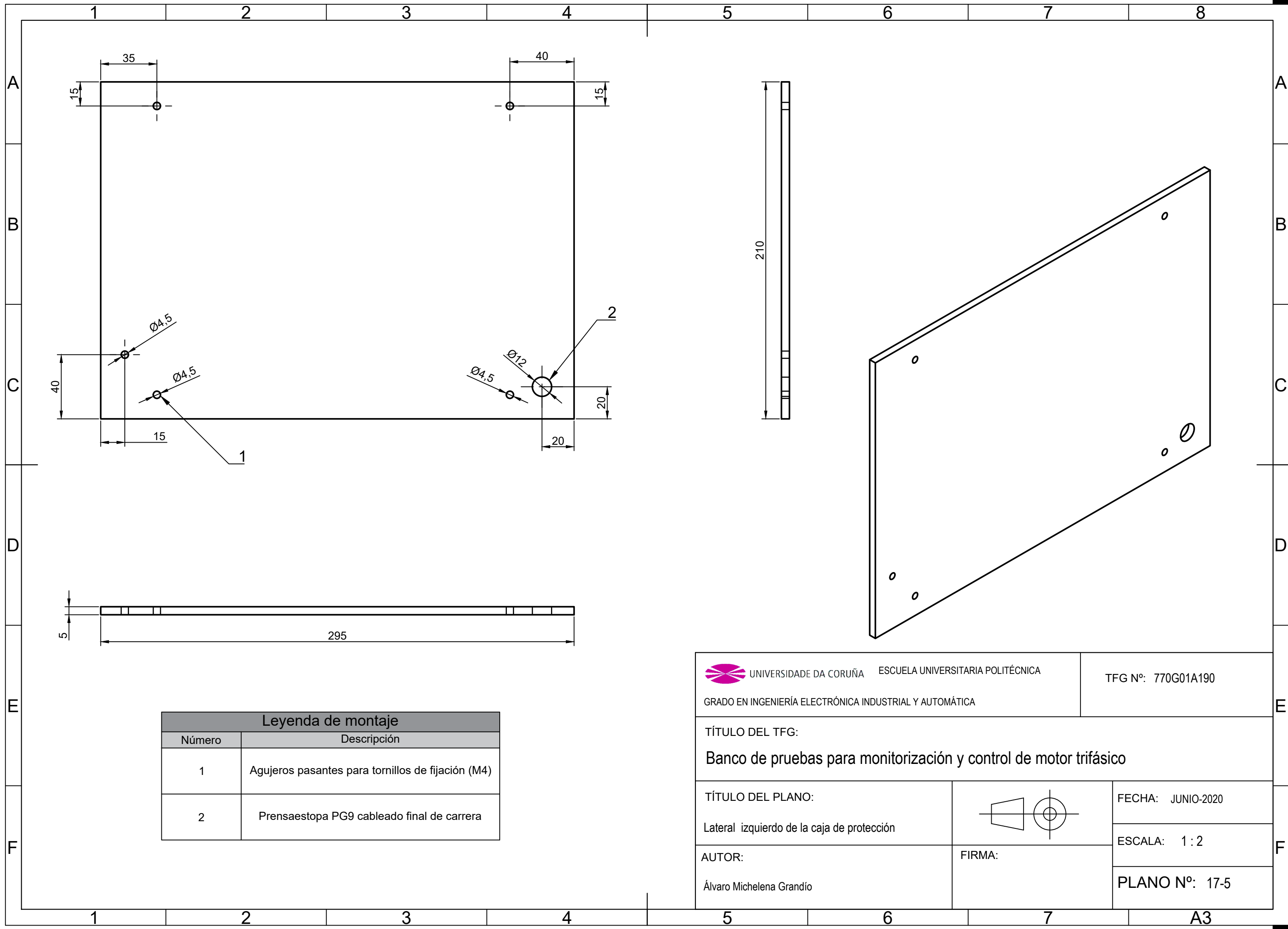






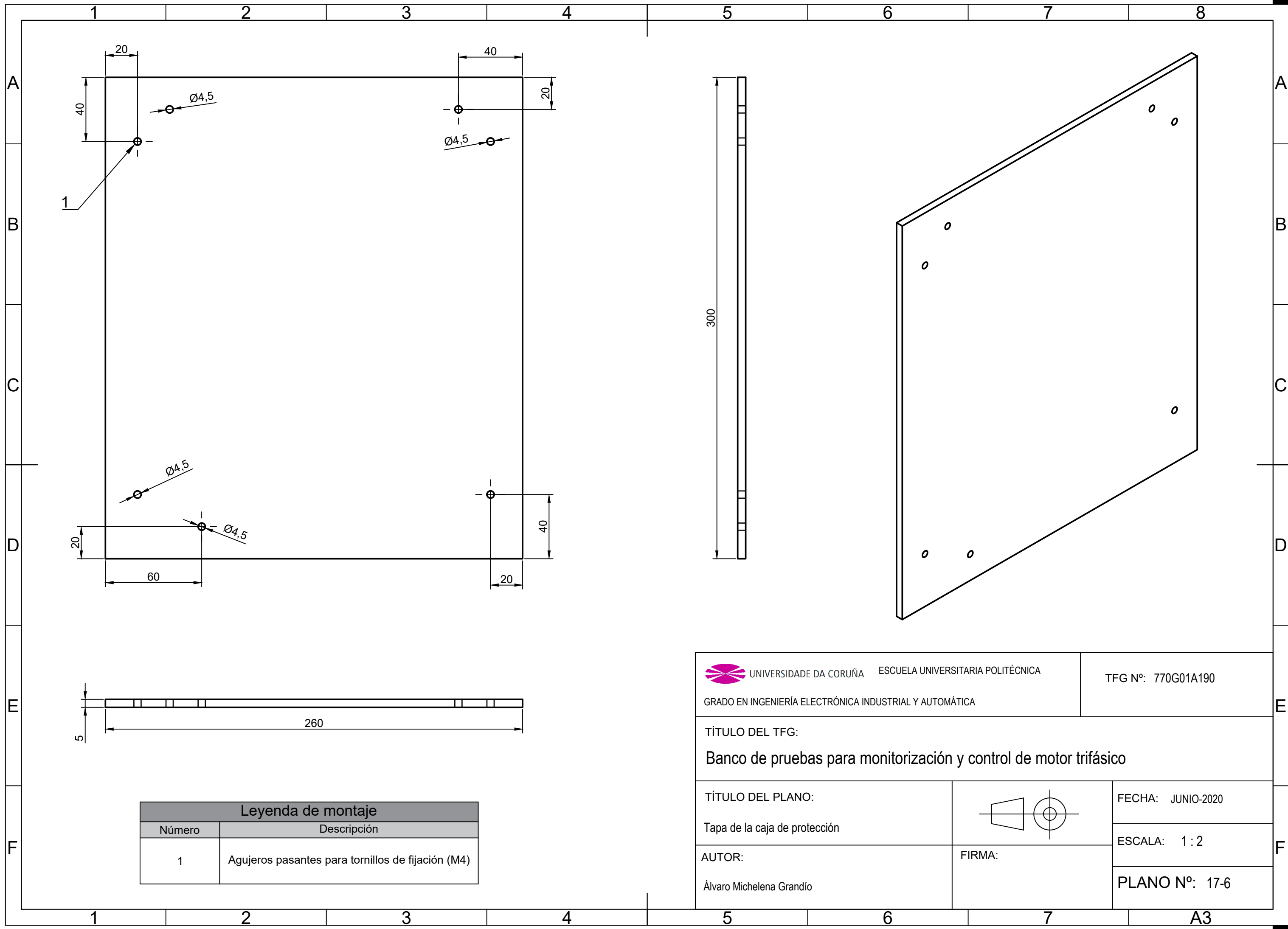
 UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA		TFG N°: 770G01A190	
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA			
TÍTULO DEL TFG: Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico			
TÍTULO DEL PLANO: Lateral derecho de la caja de protección (bisagras)			FECHA: JUNIO-2020
AUTOR: Álvaro Michelena Grandío			ESCALA: 1 : 2
			PLANO N°: 17-4














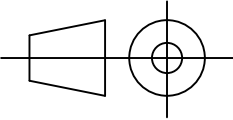
UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:  
Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:  
Tapa de la caja de protección



AUTOR:  
Álvaro Michelena Grandío

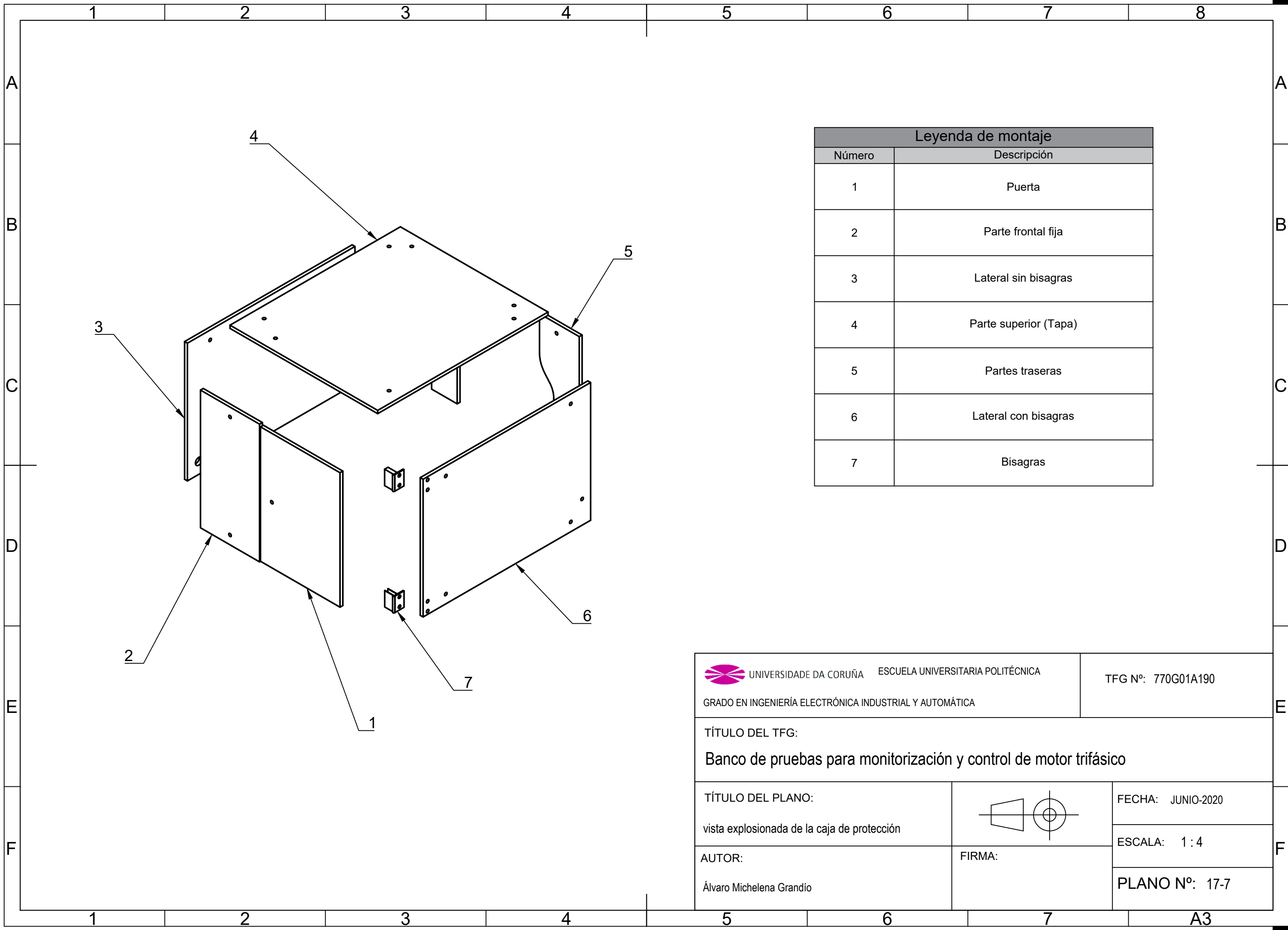
FIRMA:

FECHA: JUNIO-2020


ESCALA: 1 : 2

PLANO Nº: 17-6





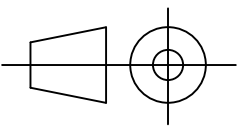
Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Puerta
2	Parte frontal fija
3	Lateral sin bisagras
4	Parte superior (Tapa)
5	Partes traseras
6	Lateral con bisagras
7	Bisagras

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG N°: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:  
Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:  
vista explosionada de la caja de protección



FECHA: JUNIO-2020

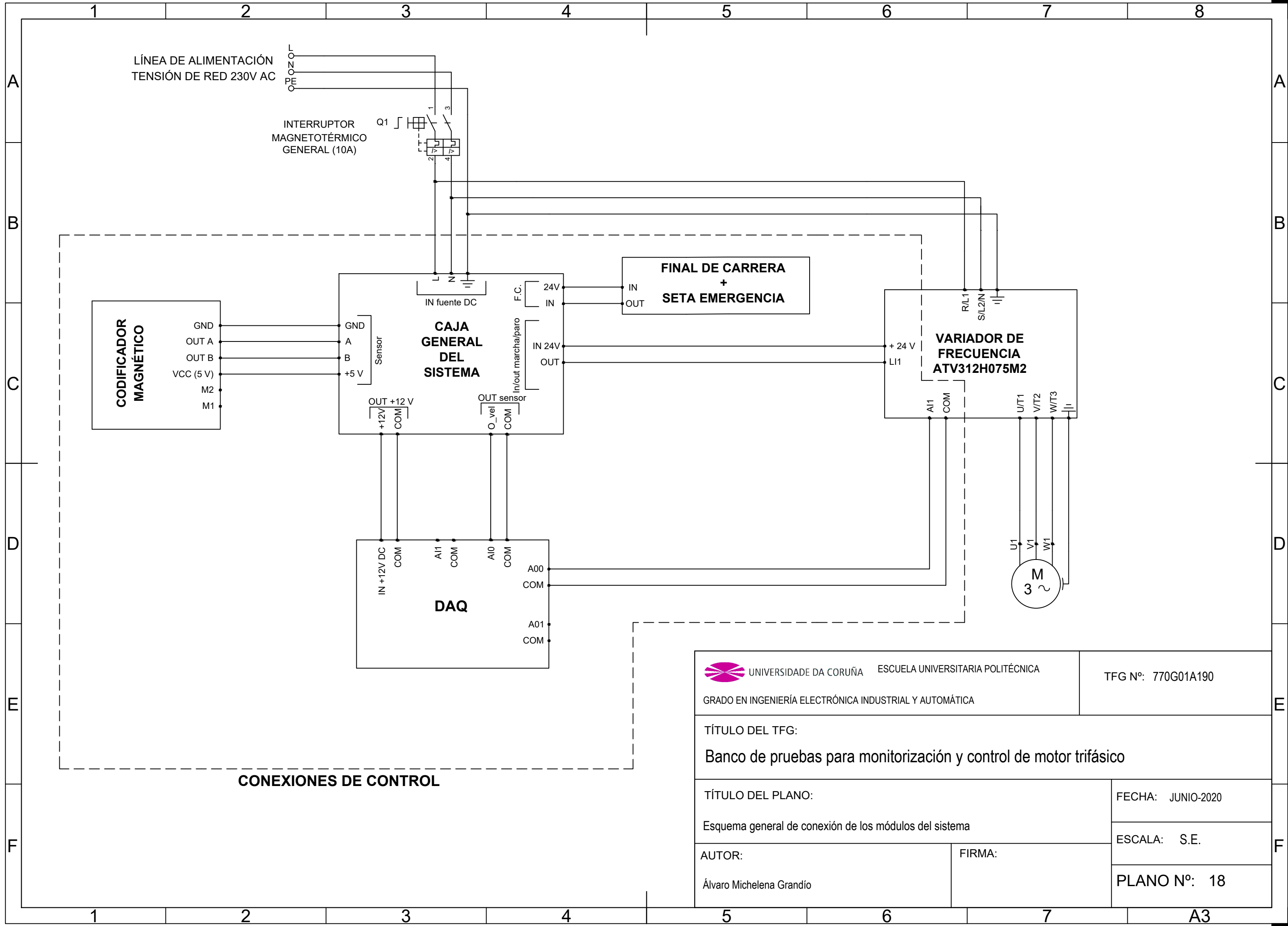
ESCALA: 1 : 4

AUTOR:  
Álvaro Michelena Grandío

FIRMA:

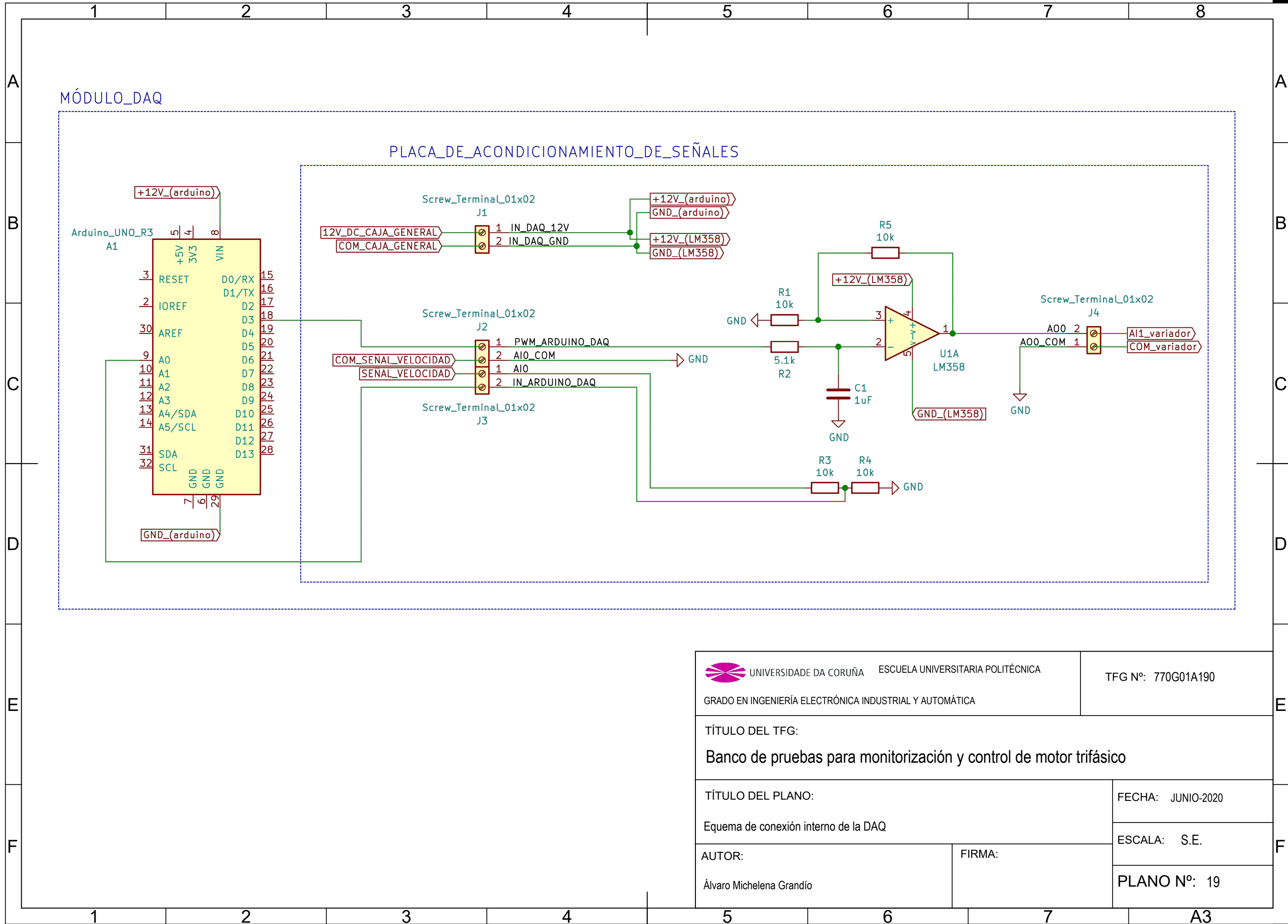
PLANO N°: 17-7





 UNIVERSIDADE DA CORUÑA    ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA		TFG Nº: 770G01A190	
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA			
TÍTULO DEL TFG:  Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico			
TÍTULO DEL PLANO:  Esquema general de conexión de los módulos del sistema		FECHA:    JUNIO-2020	
		ESCALA:    S.E.	
AUTOR:  Álvaro Michelena Grandío	FIRMA:	PLANO Nº:    18	





UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Equema de conexión interno de la DAQ

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío

FIRMA:

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: S.E.

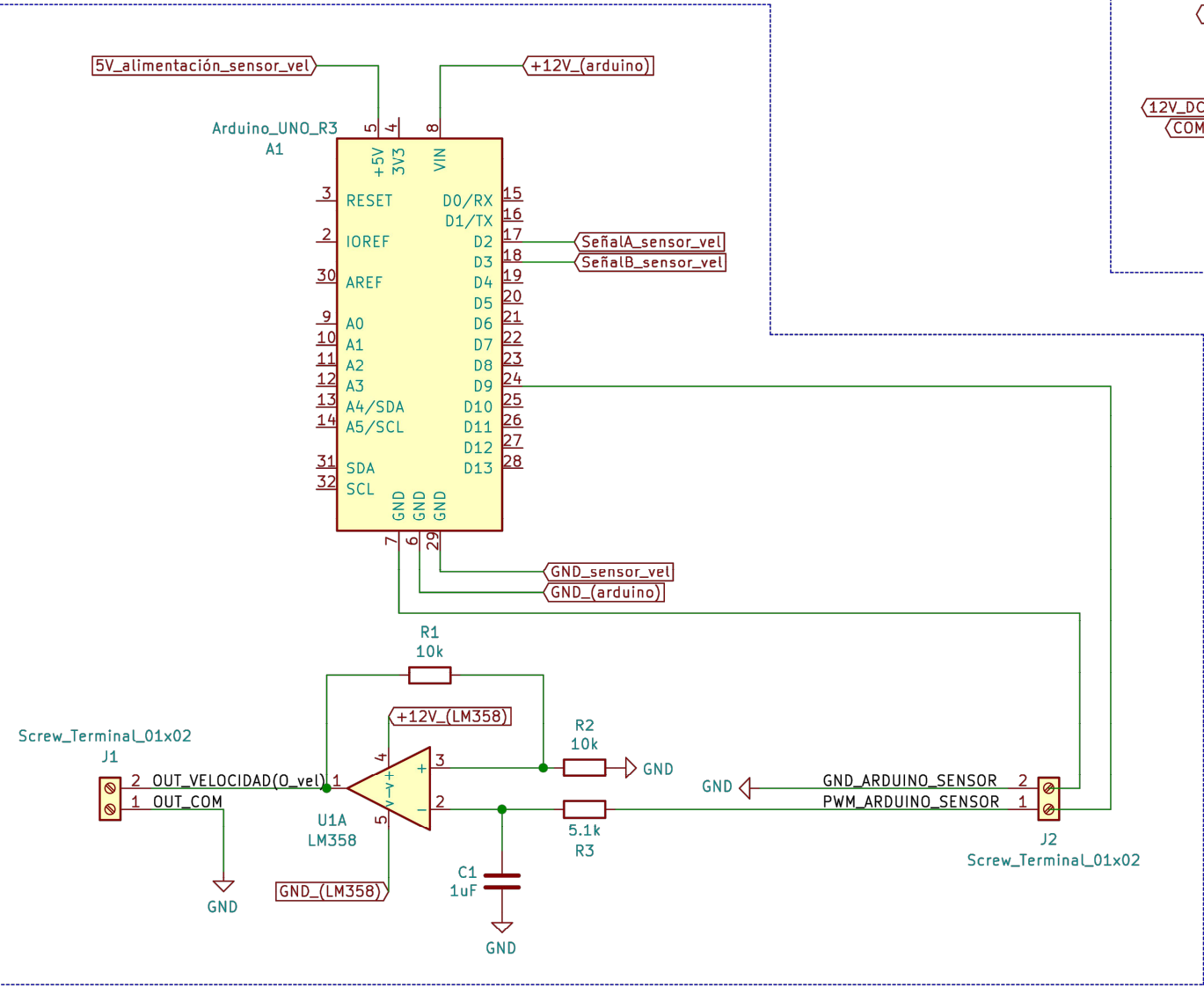
PLANO Nº: 19



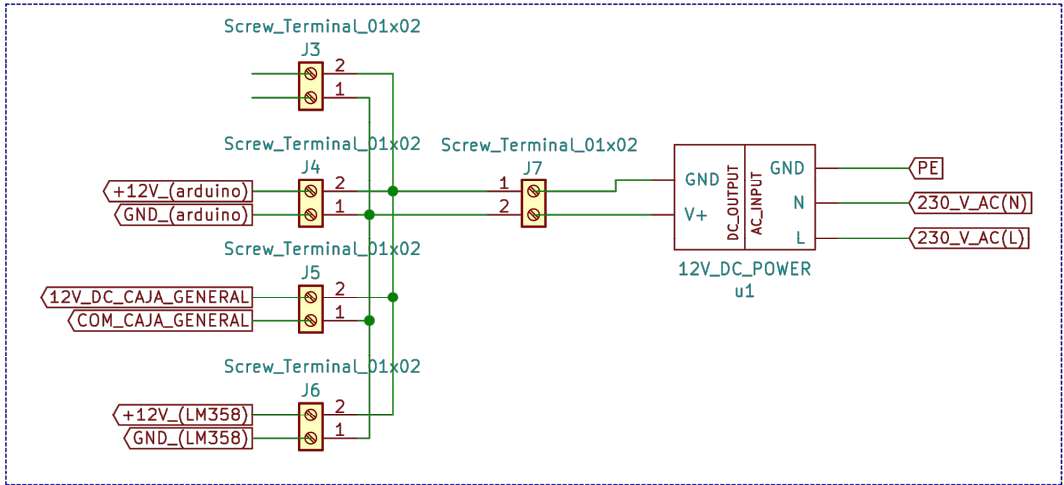


CAJA GENERAL DEL SISTEMA

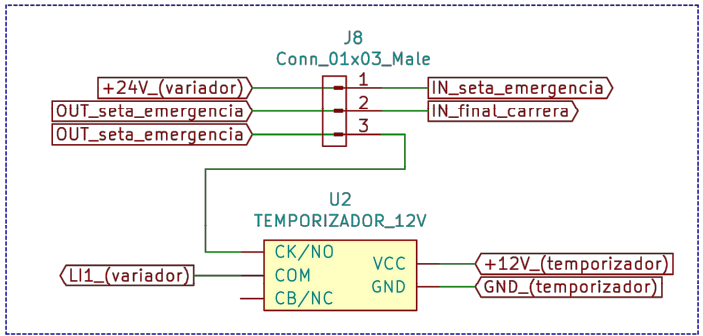
CIRCUITO DE ADAPTACIÓN DE LA SEÑAL DEL CODIFICADOR MAGNÉTICO



CONEXIÓN CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN DC



CONEXIÓN CIRCUITO MARCHA/PARO



UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Esquema de conexión interno de la caja general del sistema

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío

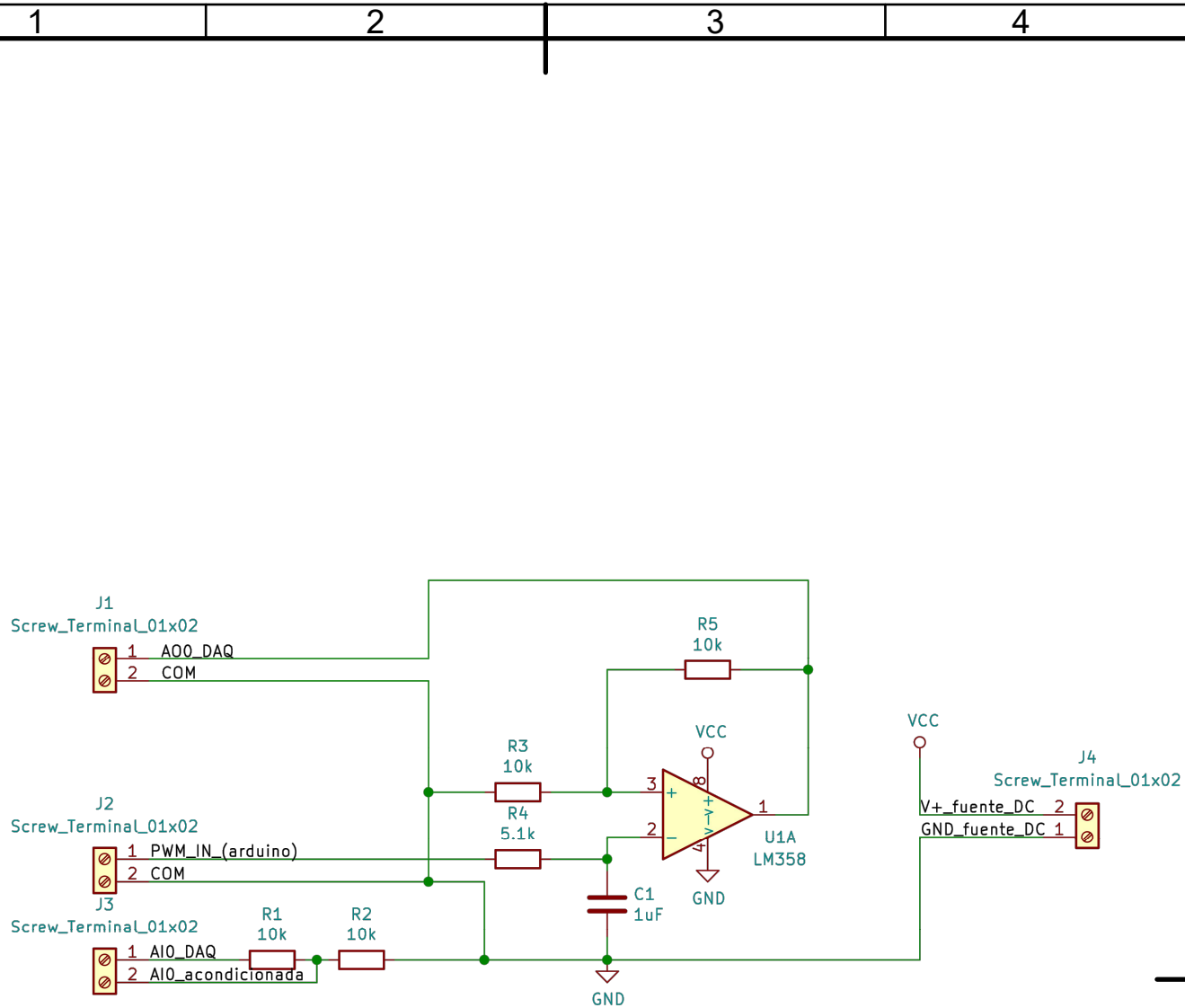
FIRMA:

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: S.E.

PLANO Nº: 20





UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Esquema eléctrico de la placa de acondicionamiento de señales (DAQ)

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: S.E.

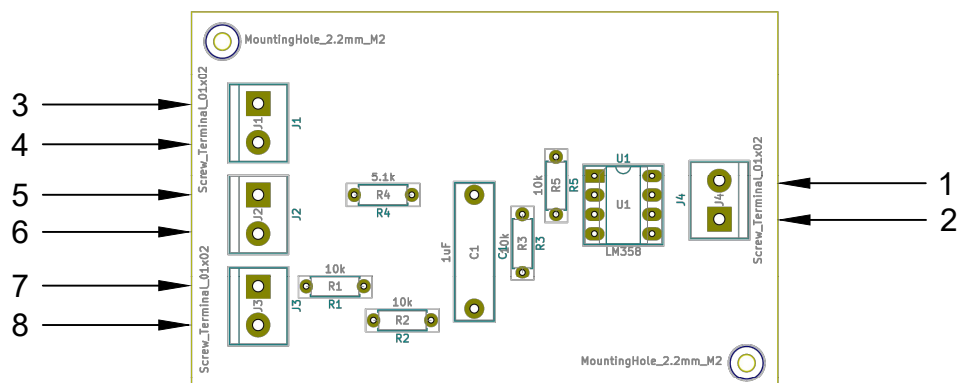
AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío

FIRMA:

PLANO Nº: 21-1





### Legenda de montaje

Número	Descripción
1	Entrada +12V DC
2	Entrada GND
3	Salida amplificada y filtrada (AO0)
4	GND señal de salida (AO0-COM)
5	Señal de entrada PWM
6	GND señal de entrada de velocidad
7	Señal de entrada de velocidad (AI0-COM)
8	Señal adaptada de salida de velocidad (0/5V)



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Disposición de componentes de la placa de acondicionamiento de señales (DAQ)

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1:1

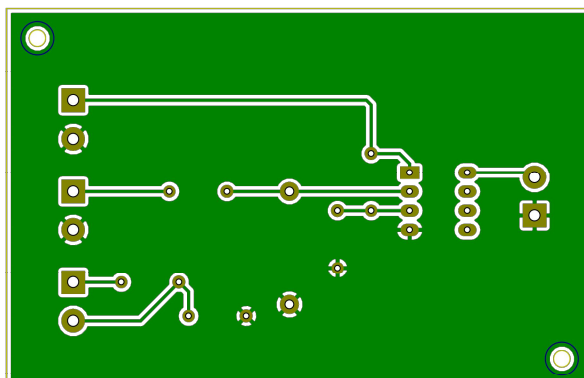
AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío

FIRMA:

PLANO Nº: 21-2





UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG N°: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Footprint de la placa de acondicionamiento de señales (DAQ)

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1:1

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío

FIRMA:

PLANO N°: 21-3





1

2

3

4

A

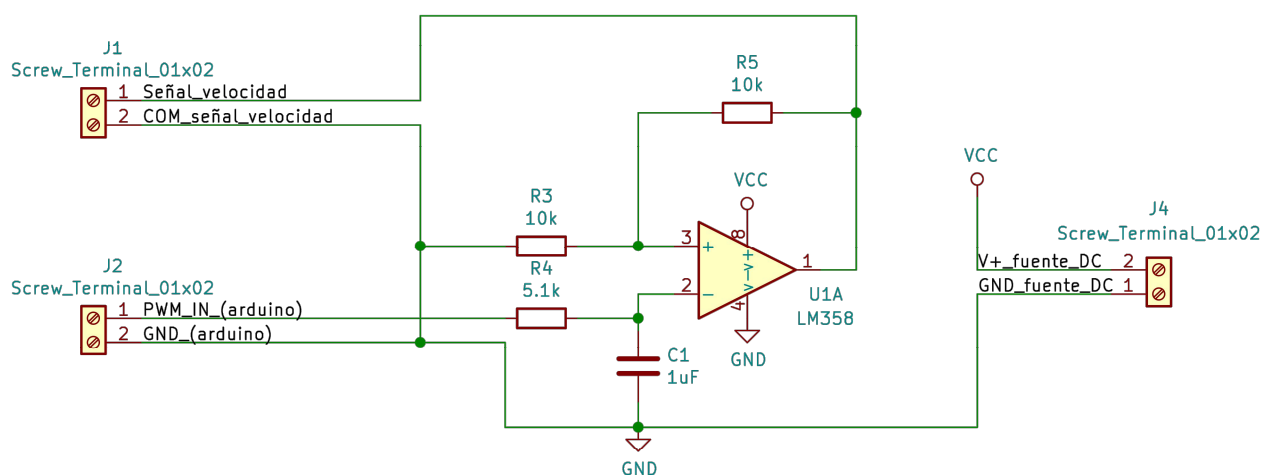
B

C

D

E

F



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Esquema eléctrico de la placa de acondicionamiento de la señal del sensor

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: S.E.

AUTOR:

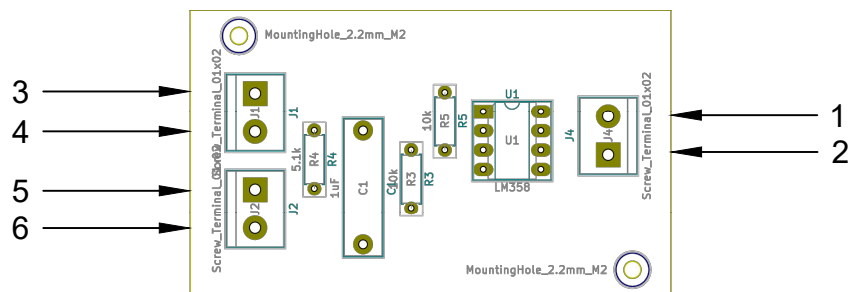
Álvaro Michelena Grandío

FIRMA:

PLANO Nº: 22-1

A4





### Legenda de montaje

Número	Descripción
1	Entrada +12V DC
2	Entrada GND
3	Salida amplificada y filtrada de velocidad
4	GND señal de salida (COM-Velocidad)
5	Señal de entrada PWM (Arduino)
6	GND señal de entrada PWM (Arduino)



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Disposición de componentes de la placa de acondicionamiento de la señal del sensor

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1:1

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío

FIRMA:

PLANO Nº: 22-2



1

2

3

4

A

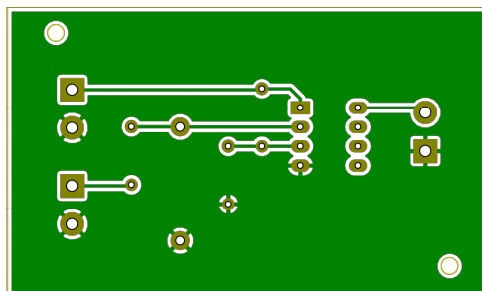
B

C

D

E

F



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG N°: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Footprint de la placa de acondicionamiento de la señal del sensor

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1:1

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío

FIRMA:

PLANO N°: 22-3

A4



1

2

3

4

A

B

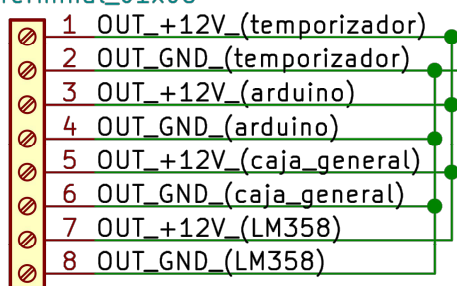
C

D

E

F

J1  
Screw\_Terminal\_01x08



IN\_+12V\_DC 1  
IN\_GND 2

J2  
Screw\_Terminal\_01x02



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Esquema eléctrico de la placa de bornes de alimentación (caja general)

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: S.E.

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío

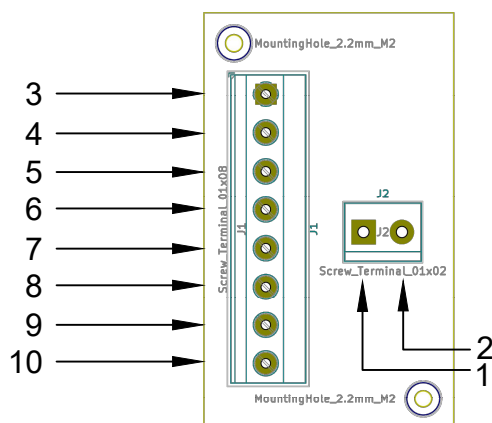
FIRMA:

PLANO Nº: 23-1

A4







Leyenda de montaje	
Número	Descripción
1	Entrada +12V DC
2	Entrada GND
3	Salida 12V DC para el temporizador
4	Salida GND para el temporizador
5	Salida 12V DC para el Arduino (caja general)
6	Salida GND para el Arduino (caja general)
7	Salida 12V DC para la DAQ
8	Salida GND para la DAQ
9	Salida 12V DC para el A.O. LM358
10	Salida GND para el A.O. LM358



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG Nº: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Disposición de componentes de la placa de bornes de alimentación (caja general)

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1:1

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío

FIRMA:

PLANO Nº: 23-2



1

2

3

4

A

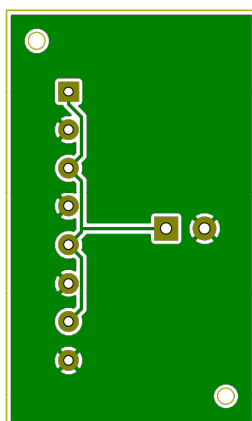
B

C

D

E

F



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG N°: 770G01A190

TÍTULO DEL TFG:

Banco de pruebas para monitorización y control de motor trifásico

TÍTULO DEL PLANO:

Footprint de la placa de bornes de alimentación (caja general)

FECHA: JUNIO-2020

ESCALA: 1:1

AUTOR:

Álvaro Michelena Grandío

FIRMA:

PLANO N°: 23-3

A4



**TÍTULO: BANCO DE PRUEBAS PARA MONITORIZACIÓN Y CONTROL  
DE MOTOR TRIFÁSICO**

---

# **PLIEGO DE CONDICIONES**

---

**PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

**AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N**

**15405 - FERROL**

**FECHA: JUNIO DE 2020**

**AUTOR: EL ALUMNO**

**Fdo.: ÁLVARO MICHELENA GRANDÍO**



## **Índice del documento PLIEGO DE CONDICIONES**





Dado que se lleva a cabo el diseño de un prototipo, el Pliego de Condiciones queda fuera del alcance de este TFG.



**TÍTULO: BANCO DE PRUEBAS PARA MONITORIZACIÓN Y CONTROL  
DE MOTOR TRIFÁSICO**

---

# **MEDICIONES**

---

**PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

**AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N**

**15405 - FERROL**

**FECHA: JUNIO DE 2020**

**AUTOR: EL ALUMNO**

**Fdo.: ÁLVARO MICHELENA GRANDÍO**




## Índice del documento MEDICIONES

<b>13 Banco de pruebas para motor trifásico</b>	<b>265</b>
13.1 Base y soporte del proyecto . . . . .	265
13.2 Dispositivos eléctricos y electrónicos del sistema . . . . .	265
13.3 Acondicionamiento de la señal del sensor y tarjeta de adquisición de datos . . .	266
13.4 Caja de protección . . . . .	267
13.5 Fabricación de piezas en 3D . . . . .	267
13.6 Conectores y cables . . . . .	269
13.7 Tornillería . . . . .	271
 <b>14 Licencias software</b>	 <b>272</b>
 <b>15 Mano de obra</b>	 <b>273</b>



## 13 Banco de pruebas para motor trifásico



### 13.1. Base y soporte del proyecto

Imagen	Descripción	Cantidad(uds)
	Tablero 80x70 cm (3 cm grosor)	1

**Tabla 13.1** – Lista de mediciones de base y soporte del sistema

### 13.2. Dispositivos eléctricos y electrónicos del sistema

Imagen	Descripción	Cantidad(uds)
	Motor trifásico Cemer 1 CV (1500 r.p.m.)	1
	Codificador magnético Pololu	1
	Disco imantado 20 C.P.R.	1
	Variador de frecuencia ATV312H075M2	1
	Interruptor magnetotérmico 10 A	1
	Fuente de alimentación 230 V AC a 12 V DC (2,9 A)	1
	Seta de emergencia	1

	Modulo temporizador 12V DC	1
	Final de carrera con palanca larga	1

**Tabla 13.2** – Lista de mediciones de dispositivos eléctricos y electrónicos del sistema





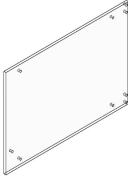
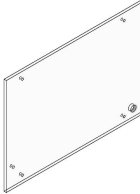
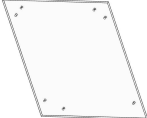
### 13.3. Acondicionamiento de la señal del sensor y tarjeta de adquisición de datos

Imagen	Descripción	Cantidad(uds)
	Arduino Uno Rev 3	2
	Amplificador Operacional LM358 DIP-8	2
	Zócalo torneado 8 pines para PCB	2
	Bornas de 2 polos para PCB (Paso de 5mm) - Fijación por tornillos	12
	Resistencia de película de carbón 5,1 kΩ - 1 % - 1/4W	2
	Resistencia de película de carbón 10 kΩ - 5 % - 1/4W	6
	Condensador MKT 1 $\mu$ F - 100V	2
	Placa perforada baquelita (50 x 70 mm)	2

**Tabla 13.3** – Lista de mediciones para el acondicionamiento de la señal del sensor y tarjeta de adquisición de datos

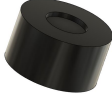
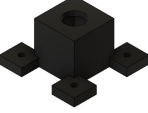
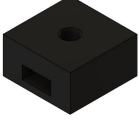

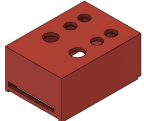


### 13.4. Caja de protección

Imagen	Descripción	Cantidad(uds)	Superficie mm <sup>2</sup>
	Plancha policarbonato compacto 5mm grosor (600x500mm)	1	281320 mm <sup>2</sup>
	Puerta policarbonato 5mm grosor (140x205mm)	1	28700 mm <sup>2</sup>
	Parte delantera fija policarbonato 5mm grosor (104x210mm)	1	21320 mm <sup>2</sup>
	Parte trasera policarbonato 5mm grosor	2	29400 mm <sup>2</sup>
	Lateral derecho policarbonato 5mm grosor (295x210mm)	1	61950 mm <sup>2</sup>
	Lateral izquierdo policarbonato 5mm grosor (295x210mm)	1	61950 mm <sup>2</sup>
	Tapa policarbonato 5mm grosor (300x260mm)	1	78000 mm <sup>2</sup>

**Tabla 13.4** – Lista de mediciones para la caja de protección

### 13.5. Fabricación de piezas en 3D



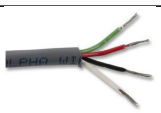
Imagen	Descripción	Cantidad(uds)	Peso(gramos)
	Bobina de filamento PLA Negro BQ 1kg (1.75mm)	1	529,4
	Soporte disco imantado 20 C.P.R.	1	1,8
	Carcasa del sistema de ventilación y soporte del sensor	1	110
	Soporte conector 4 pines sensor	1	15,6
	Soporte tuercas M3 para la fijación del conector	4	5,4
	Caja del sistema DAQ	1	64
	Tapa para la caja del sistema DAQ	1	21,6
	Caja general del sistema	1	253
	Tapa para la caja general del sistema	1	58
	Bobina de filamento PLA Rojo BQ 1kg (1.75mm)	1	203,6
	Carcasa conectores variador de frecuencia	1	95
	Carcasa conectores interruptor magnetotérmico	1	108,6

**Tabla 13.5** – Lista de mediciones para la fabricación de piezas en 3D

### 13.6. Conectores y cables

Imagen	Descripción	Cantidad(uds)
	Conector 4 pines macho (base)	2
	Conector 4 pines hembra (aérea)	2
	Conector banana 4mm hembra con conector Faston (Color rojo)	10
	Conector banana 4mm hembra con conector Faston (Color negro)	10
	Conector banana 4mm macho aérea (Color rojo)	8
	Conector banana 4mm macho aérea (Color negro)	8
	Prensaestopa PG7	2
	Prensaestopa PG9	6
	Prensaestopa PG13.5	1
	Conector Faston hembra (con funda) para macho 6,3x0,8 mm	12
	Conector Faston hembra (con funda) para macho 2,8x0,8 mm	2

	Conector Faston redondo preaislado (Diámetro 5,3 y sección 1,04-2,63mm)	4
	Ficha de conexión 30A	1
	Conector macho para PCB	8
	Puntera hueca de crimpado aislado E0508 (0.5mm <sup>2</sup> - 22AWG)	30
	Puntera hueca de crimpado aislado E7508 (1mm <sup>2</sup> - 18AWG)	6
	Puntera hueca de crimpado aislado E1508 (1.5mm <sup>2</sup> - 16AWG)	20
	Cable USB con conexión USB tipo A y USB tipo B	1
	Jumper de conexión macho-macho	4
	Cable de alimentación con conector Schuko macho (Cable H05VV-F 3x1,5mm <sup>2</sup> )	1
	Cable flexible 0,5mm <sup>2</sup> (rojo)	1,5 m
	Cable flexible 0,5mm <sup>2</sup> (negro)	1,5 m
	Cable tetrapolar Powerflex (4G - 1,5mm <sup>2</sup> )	0,5 m
	Cable tripolar (Cable H05VV-F 3x1mm <sup>2</sup> )	0,5 m

	Cable bipolar (2x1mm <sup>2</sup> )	0,5 m
	Cable bipolar trenzado (2x1mm <sup>2</sup> )	1,5 m
	Cable de 4 hilos para sensores (4x0.25mm <sup>2</sup> )	0,5 m

**Tabla 13.6** – Lista de mediciones para los conectores y cables empleados en el proyecto

### 13.7. Tornillería

Imagen	Descripción	Cantidad(uds)
	Tornillos madera cabezal avellanado (20x3.5 mm)	9
	Tornillos DIN-571 cabeza hexagonal para madera (M6x40mm). Fijación del motor	4
	Arandelas (M6)	4
	Tornillos DIN-933 cabeza hexagonal (M4x16mm) para la caja de protección	23
	Tornillos DIN-84 cabeza ranurada (M4x30mm) para la sujeción de la seta de emergencia	4
	Arandelas (M4)	55
	Tuercas (M4)	55

	Tornillos DIN-84 cabeza ranurada (M3x16mm)	4
	Tuercas (M3)	4
	Tornillos DIN-933 cabeza hexagonal (M5x16mm) para la sujeción de la carcasa del variador	2
	Tornillos avellanado DIN-963 cabeza ranurada (M4x10mm) para la sujeción de las bisagras	4
	Bisagras con fijación 90°	2
	Escuadras 90° (20 mm)	14

**Tabla 13.7** – Lista de mediciones para el acondicionamiento de la señal del sensor y tarjeta de adquisición de datos

## 14 Licencias software

Software empleado	Horas de uso
Autodesk Fusion 360 2019	200 h
Autodesk AutoCAD 2016	30 h
Orcad Capture CIS 17.2	20 h
KiCad 5.0.2.	20 h
Arduino IDE 1.8.11	30 h
MathWorks Matlab 2017a	90 h
Microsoft Office 365 ProPlus: PowerPoint	15 h

**Tabla 14.1** – Lista de las mediciones de software

## 15 Mano de obra

Proceso	Categoría profesional	Horas
Análisis de las posibles soluciones	Graduado en Ingeniería Técnica Industrial Especialidad en Electrónica Industrial y Automática	40 h
Selección de la solución adoptada	Graduado en Ingeniería Técnica Industrial Especialidad en Electrónica Industrial y Automática	20 h
Diseño del banco de pruebas	Graduado en Ingeniería Técnica Industrial Especialidad en Electrónica Industrial y Automática	300 h
Selección de los componentes eléctricos y electrónicos del sistema	Graduado en Ingeniería Técnica Industrial Especialidad en Electrónica Industrial y Automática	50 h
Simulación y diseño de los circuitos de adaptación de señales	Graduado en Ingeniería Técnica Industrial Especialidad en Electrónica Industrial y Automática	20 h
Programación software de los diferentes dispositivos programables del sistema	Graduado en Ingeniería Técnica Industrial Especialidad en Electrónica Industrial y Automática	130 h
Fabricación y montaje del sistema	Graduado en Ingeniería Técnica Industrial Especialidad en Electrónica Industrial y Automática	250 h
Puesta en marcha	Graduado en Ingeniería Técnica Industrial Especialidad en Electrónica Industrial y Automática	10 h
Redacción del proyecto	Graduado en Ingeniería Técnica Industrial Especialidad en Electrónica Industrial y Automática	350 h
<b>Total</b>		<b>1170 h</b>

**Tabla 15.1** – Lista de mediciones de mano de obra





TÍTULO: **BANCO DE PRUEBAS PARA MONITORIZACIÓN Y CONTROL  
DE MOTOR TRIFÁSICO**

---

# **PRESUPUESTO**

---

PETICIONARIO: **ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**

**AVDA. 19 DE FEBREIRO, S/N**

**15405 - FERROL**

FECHA: **JUNIO DE 2020**

AUTOR: **EL ALUMNO**

Fdo.: **ÁLVARO MICHELENA GRANDÍO**



**Índice del documento PRESUPUESTO**

<b>16 Banco de pruebas para motor trifásico</b>	<b>279</b>
16.1 Base y soporte del proyecto . . . . .	279
16.2 Dispositivos eléctricos y electrónicos del sistema . . . . .	279
16.3 Acondicionamiento de la señal del sensor y tarjeta de adquisición de datos . . .	280
16.4 Caja de protección . . . . .	280
16.5 Fabricación de piezas en 3D . . . . .	281
16.6 Conectores y cables . . . . .	281
16.7 Tornillería . . . . .	283
<b>17 Licencias software</b>	<b>284</b>
<b>18 Mano de obra</b>	<b>285</b>
<b>19 Presupuesto total</b>	<b>287</b>



## 16 Banco de pruebas para motor trifásico

### 16.1. Base y soporte del proyecto

Descripción	Cantidad	Precio uni. (€)	Precio tot. (€)
Tablero 80x70 cm (3 cm grosor)	1	22 €	22 €
<b>Importe total</b>			<b>22 €</b>

**Tabla 16.1** – Lista de precios para la base y soporte del proyecto

### 16.2. Dispositivos eléctricos y electrónicos del sistema

Descripción	Cantidad	Precio uni. (€)	Precio tot. (€)
Motor trifásico 1 CV (1500 r.p.m.)	1	66,17 €	66,17 €
Codificador magnético Pololu	1	3,90 €	3,90 €
Disco imantado 20 C.P.R.	1	0,77 €	0,77 €
Variador de frecuencia ATV312H075M2	1	370,93 €	370,93 €
Interruptor magnetotérmico 10 A	1	4,15 €	4,15 €
Fuente de alimentación 230 AC a 12 V DC (2,9 A)	1	5,35 €	5,35 €
Seta de emergencia	1	2,10 €	2,10 €
Modulo temporizador 12V DC	1	1,38 €	1,38 €
Final de carrera con palanca larga	1	1,60 €	1,60 €
<b>Importe total</b>			<b>456,35 €</b>

**Tabla 16.2** – Lista de precios para los dispositivos eléctricos y electrónicos del sistema

### 16.3. Acondicionamiento de la señal del sensor y tarjeta de adquisición de datos

Descripción	Cantidad	Precio uni. (€)	Precio tot. (€)
Arduino Uno Rev 3 (Réplica)	2	3,10 €	6,20 €
Amplificador Operacional LM358 DIP-8	2	1,02 €	2,04 €
Zócalo torneado 8 pines para PCB	2	0,25 €	0,50 €
Bornas de 2 polos para PCB (Paso de 5mm) - Fijación por tornillos	12	0,29 €	3,48 €
Resistencia de película de carbón 5,1 k $\Omega$ - 1 % - 1/4W	2	0,07 €	0,14 €
Resistencia de película de carbón 10 k $\Omega$ - 5 % - 1/4W	6	0,04 €	0,24 €
Condensador MKT 1 $\mu F$ - 100V	2	0,91 €	1,82 €
Placa perforada baquelita (50 x 70 mm)	2	0,87 €	1,74 €
<b>Importe total</b>			<b>16,52 €</b>

**Tabla 16.3** – Lista de precios para el acondicionamiento de la señal del sensor y tarjeta de adquisición de datos

### 16.4. Caja de protección

Descripción	Cantidad	Superficie mm <sup>2</sup>	Precio uni. (€)	Precio tot. (€)
Polycarbonato 5mm	1	300000 mm <sup>2</sup>	35,05 €	32,86 €
Puerta	1	28700 mm <sup>2</sup>	3,35 €	-
Parte delantera fija	1	21320 mm <sup>2</sup>	2,49 €	-
Parte trasera	2	29400 mm <sup>2</sup>	3,43 €	-
Lateral derecho	1	61950 mm <sup>2</sup>	7,24 €	-
Lateral izquierdo	1	61950 mm <sup>2</sup>	7,24 €	-
Tapa	1	78000 mm <sup>2</sup>	9,11 €	-
<b>Importe total</b>				<b>32,86 €</b>

**Tabla 16.4** – Lista de precios para la fabricación de la caja de protección**16.5. Fabricación de piezas en 3D**

Descripción	Cantidad	Peso (g)	Precio uni. (€)	Precio tot. (€)
Bobina de filamento PLA Negro BQ (1.75mm)	1	1000 g	17,90 €	9,49 €
Soporte disco imantado	1	1,8 g	0,03 €	-
Carcasa sist.ventilación	1	110 g	1,97 €	-
Soporte conector sensor	1	15,6 g	0,28 €	-
Soporte tuercas M3	4	5,4 g	0,10 €	-
Caja DAQ	1	64 g	1,15 €	-
Tapa DAQ	1	21,6 g	0,39 €	-
Caja general	1	253 g	4,53 €	-
Tapa caja general	1	58 g	1,04 €	-
Bobina de filamento PLA Rojo BQ (1.75mm)	1	1000 g	17,90 €	3,64 €
Carcasa variador de frecuencia	1	95 g	1,70 €	-
Carcasa interruptor magnetotérmico	1	108,6 g	1,94 €	-
<b>Importe total</b>				<b>13,13 €</b>

**Tabla 16.5** – Lista de precios para la fabricación de las piezas en 3D**16.6. Conectores y cables**

Descripción	Cantidad	Precio uni. (€)	Precio tot. (€)
Conector 4 pines macho (base)	2	0,91 €	1,82 €
Conector 4 pines hembra (aérea)	2	0,91 €	1,82 €

Conector banana 4mm hembra con conector Faston (Color rojo)	10	0,60 €	6 €
Conector banana 4mm hembra con conector Faston (Color negro)	10	0,60 €	6 €
Conector banana 4mm macho aérea (Color rojo)	8	0,59 €	4,72 €
Conector banana 4mm macho aérea (Color negro)	8	0,59 €	4,72 €
Prensaestopa PG7	2	0,26 €	0,52 €
Prensaestopa PG9	6	0,35 €	2,10 €
Prensaestopa PG13.5	1	0,51 €	0,51 €
Conector Faston hembra (con funda) - 6,3x0,8 mm	12	0,07 €	0,84 €
Conector Faston hembra (con funda) para macho 2,8x0,8 mm	2	0,05 €	0,10 €
Conector Faston redondo preaislado (Diámetro 5,3 y sección 1,04-2,63mm)	4	0,11 €	0,44 €
Ficha de conexión 30A	1	0,52 €	0,52 €
Conector macho para PCB (regleta 40 pines)	1	0,64 €	0,64 €
Puntera hueca de crimpado aislado E0508 (0.5mm <sup>2</sup> - 22AWG)	30	0,02 €	0,60 €
Puntera hueca de crimpado aislado E7508 (1mm <sup>2</sup> - 18AWG)	6	0,04 €	0,24 €



Puntera hueca de crimpado aislado E1508 (1.5mm <sup>2</sup> - 16AWG)	20	0,04 €	0,8 €
Cable USB con conexión USB tipo A y USB tipo B	1	1,20 €	1,20 €
Jumper de conexión macho-macho (paquete 40 pcs)	1	1,23 €	1,23 €
Cable de alimentación con conector Schuko macho (Cable H05VV-F 3x1,5mm <sup>2</sup> )	1	2,10 €	2,10 €
Cable flexible 0,5mm <sup>2</sup> (rojo)	1,5 m	0,20 €	0,30 €
Cable flexible 0,5mm <sup>2</sup> (negro)	1,5 m	0,20 €	0,30 €
Cable tetrapolar Powerflex (4G - 1,5mm <sup>2</sup> )	0,5 m	0,82 €	0,41 €
Cable tripolar (Cable H05VV-F 3x1mm <sup>2</sup> )	0,5 m	0,57 €	0,29 €
Cable bipolar (2x1mm <sup>2</sup> )	0,5 m	0,40 €	0,20 €
Cable bipolar trenzado (2x1mm <sup>2</sup> )	1,5 m	0,35 €	0,53 €
Cable de 4 hilos para sensores (4x0.25mm <sup>2</sup> )	0,5 m	0,63 €	0,32 €
<b>Importe total</b>			<b>39,27 €</b>

**Tabla 16.6** – Lista de precios de los conectores y cables empleados en el proyecto

## 16.7. Tornillería

Descripción	Cantidad	Precio uni. (€)	Precio tot. (€)
Tornillos madera cabezal avellanado (20x3.5 mm)	9	0,05 €	0,45 €

Tornillos cabeza hexagonal para madera (M6x40mm)	4	0,15 €	0,60 €
Arandelas (M6)	4	0,01 €	0,04 €
Tornillos DIN-933 cabeza hexagonal (M4x16mm)	23	0,04 €	0,92 €
Tornillos DIN-84 cabeza ranurada (M4x30mm)	4	0,17 €	0,68 €
Arandelas (M4)	55	0,01 €	0,55 €
Tuercas (M4)	55	0,02 €	1,1 €
Tornillos DIN-84 cabeza ranurada (M3x16mm)	4	0,12 €	0,48 €
Tuercas (M3)	4	0,01 €	0,04 €
Tornillos DIN-933 cabeza hexagonal (M5x16mm)	2	0,06 €	0,12 €
Tornillos avellanado DIN-963 cabeza ranurada (M4x10mm)	4	0,10 €	0,40 €
Bisagras con fijación 90º (Pack de 2)	1	6,25 €	6,25 €
Escuadras 90º (20 mm)	14	0,30 €	4,20 €
<b>Importe total</b>			<b>15,83 €</b>

**Tabla 16.7** – Lista de precios para la tornillería

## 17 Licencias software

Software	Horas de uso (h)	Precio uni. (€)	Precio tot. (€)
Autodesk Fusion 360 2019	200 h	61 €/mes	16,94 €
Autodesk AutoCAD 2016	30 h	279 €/mes	11,63 €

Orcad Capture CIS 17.2	20 h	531 €/año	1,21 €
KiCad 5.0.2.	20 h	Gratis	Gratis
Arduino IDE 1.8.11	30 h	Gratis	Gratis
MathWorks Matlab 2017a	90 h	800 €/año	8,22 €
Microsoft Office 365 ProPlus: PowerPoint	15 h	10,50 €/mes	0,22 €
<b>Importe total</b>			<b>38,22 €</b>

**Tabla 17.1** – Lista de precios de las licencias de software

## 18 Mano de obra

Proceso	Ct. prof	Horas	Precio uni. (€)	Precio tot. (€)
Análisis de las posibles soluciones	Graduado en Ing. Téc. Ind. Esp. Electrónica Ind. y Automática	40 h	40 €/h	1600 €
Selección de la solución adoptada	Graduado en Ing. Téc. Ind. Esp. Electrónica Ind. y Automática	20 h	40 €/h	800 €
Diseño del banco de pruebas	Graduado en Ing. Téc. Ind. Esp. Electrónica Ind. y Automática	300 h	40 €/h	12000 €
Selección de los componentes eléctricos y electrónicos del sistema	Graduado en Ing. Téc. Ind. Esp. Electrónica Ind. y Automática	50 h	40 €/h	2000 €
Simulación y diseño de los circuitos de adaptación de señales	Graduado en Ing. Téc. Ind. Esp. Electrónica Ind. y Automática	20 h	40 €/h	800 €

Programación software de los diferentes dispositivos programables del sistema	Graduado en Ing. Téc. Ind. Esp. Electrónica Ind. y Automática	130 h	40 €/h	5200 €
Fabricación y montaje	Graduado en Ing. Téc. Ind. Esp. Electrónica Ind. y Automática	250 h	40 €/h	10000 €
Puesta en marcha	Graduado en Ing. Téc. Ind. Esp. Electrónica Ind. y Automática	10 h	40 €/h	400 €
Redacción del proyecto	Graduado en Ing. Téc. Ind. Esp. Electrónica Ind. y Automática	350 h	40 €/h	14000 €
<b>Importe total</b>				<b>46800 €</b>

**Tabla 18.1** – Lista de precios de la mano de obra

## 19 Presupuesto total

Descripción / Concepto		Importe partida (€)	Importe total (€)
Banco de pruebas de motor trifásico	Base y soporte	22,00 €	595,96 €
	Disp. eléctricos y electrónicos	456,35 €	
	Acondicionamiento de señales y DAQ	16,52 €	
	Caja de protección	32,86 €	
	Fabricación piezas en 3D	13,13 €	
	Conectores y cables	39,27 €	
	Tornillería	15,83 €	
Licencias software	-	-	38,22 €
Mano de obra	Graduado en Ing. Téc. Ind. Especialidad en Electrónica Ind. y Automática	-	46800 €
<b>SUBTOTAL</b>			47434,18 €
<b>IVA (21 %)</b>			9961,18 €
<b>TOTAL</b>			57395,36 €

**Tabla 19.1** – Listado de precios totales

El coste total asciende a la cantidad de **CINCUENTA Y SIETE MIL TRESCIENTOS NO-VENTA Y CINCO EUROS CON TREINTA Y SEIS CÉNTIMOS DE EURO (57395,36 €)**.